EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN

MATHEMATISCH-
NATURWISSENSCHAFTLICHE
FAKULTÄT

Fortgeschrittenen-Praktikum

Versuch MCP-Detektoren

Jürgen Barnstedt

Kepler Center for Astro and Particle Physics
Institut für Astronomie und Astrophysik
Abteilung Astronomie
Sand 1
72076 Tübingen

Stand: 25. Juli 2012

http://www.uni-tuebingen.de/de/4203

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 4
1.1 Hintergrund ... 4
1.2 Ergebnisse des Echelle-Spektrometers der ORFEUS II Mission ... 6
2 Funktionsprinzip der MCP-Detektoren ... 8
2.1 Einleitung ... 8
2.2 Mikrokanalplatten (MCPs) und Elektronenvervielfacher-Kanäle ... 9
2.2.1 Herstellung von MCPs ... 9
2.2.2 Elektronenvervielfacher-Kanäle ... 10
2.2.3 MCP-Konfigurationen ... 10
2.2.4 Verstärkung und Impulshöhenverteilung ... 11
2.2.5 Empfindlichkeit ... 12
2.2.6 Dunkelstrom ... 13
2.2.7 Die MCPs des ORFEUS-Detektors ... 13
2.3 Die Anode ... 14
2.3.1 Einleitung ... 14
2.3.2 Das Prinzip der Keil-Streifen-Anode ... 14
2.3.3 Alternative Anodendesigns ... 16
2.3.4 Die ORFEUS-Anode ... 17
2.3.5 Andere Anodentypen ... 18
2.4 Auslese-Elektronik ... 20
2.4.1 Zur Theorie der Operationsverstärker ... 20
2.4.2 Ladungsverstärker ... 20
2.4.3 Digitaler Positions-Analysator ... 23
2.4.4 Datenerfassung am Computer ... 24
2.5 Eigenschaften der Detektorelektronik ... 25
2.5.1 Rauschen ... 25
2.5.2 *Partition Noise* ... 25
2.5.3 Übersprechen ... 27
2.5.4 Verstärkungsunterschiede ... 27
2.5.5 Offset ... 29
2.5.6 Totzeit ... 30
3 Versuchsaufbau ... 33
3.1 Detektor mit Hochspannungsversorgung und Vakuumpumpe ... 33
3.2 Optische Bank ... 34
3.3 Digitaler Positions-Analysator ... 35
3.4 Speicherbildschirm ... 36
3.5 Oszillograph ... 36
3.6 Computer und Software ... 37
3.6.1 Programm *HV-Kontrolle* ... 37
3.6.1.1 Hauptfenster ... 38
3.6.1.2 Testimpulse ... 38
3.6.1.3 Testimpuls-Anzeige ... 38
3.6.1.4 Testimpuls-Check ... 39
3.6.1.5 Verstärkungsanzeige ... 39
3.6.2 Programm *Erfassung* ... 39
3.6.2.1 Menüpunkt *Bild integrieren* ... 40
3.6.2.2 Menüpunkt *Impulshöhe integrieren* ... 40
3.6.2.3 Menüpunkt *Vollintegration* ... 41
3.6.2.4 Menüpunkt *Verstärkungsbild* ... 41

4 Versuchsdurchführung 42
4.1 Vorbemerkungen 42
4.2 Einschalten 42
4.3 Testimpulse 42
4.4 Einschalten der Hochspannung 43
4.5 Dunkelstrom 43
4.6 Was bedeutet solar blind? 44
4.7 Impulshöhenverteilung 45
4.7.1 Vollbild 45
4.7.2 Teilbild 45
4.8 Ausgasen 45
4.9 Flat Field und Verstärkungsbild 46
4.9.1 Homogenität 46
4.10 Brennweitenbestimmung nach dem Besselverfahren 47
4.11 Totzeit und Effizienz 48
4.12 Linearitätseichung 49
4.12.1 Messaufbau 49
4.12.2 Messung 49
4.12.3 Auswertung 50
4.12.4 Durchführung der Korrektur 52
4.13 Hinweise zur Anfertigung des Protokolls 53
5 Literatur und Quellen 54
6 Anhang: Naturkonstanten 56

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Seit Beginn der 1980er Jahre wurden am damaligen Astronomischen Institut (AIT), der jetzigen Abteilung Astronomie des Instituts für Astronomie und Astrophysik, Detektoren aus Mikrokanalplatten (engl. Micro Channel Plates, MCPs) aufgebaut. Bei diesen Detektoren handelt es sich um photonenzählende ortsauflösende Bilddetektoren für Vakuum-Ultraviolettlicht. Später wurden diese Detektoren auch in gekapselte Glasröhren eingebaut und mit Photokathoden für sichtbares Licht versehen. Für diese optische MCP-Kamera wurde eine schnelle Auslese-Elektronik entwickelt (Digitaler Positions-Analysator) und an einen PDP11-Rechner zur Datenerfassung angeschlossen. Mit diesem Kamerasystem wurden astronomische Beobachtungen an Großteleskopen u.a. in Asiago (Italien), am Calar Alto (Spanien) und bei der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile durchgeführt.

Mitte der 1980er Jahre wurde das Weltraumteleskop *ORFEUS* (**O**rbitales und **r**ückführbares **F**ern- und **E**xtrem-**U**ltraviolett-**S**pektrometer) als Projekt etabliert und schließlich realisiert. Dabei lag die wissenschaftliche Projektleitung beim AIT und es wurde hier auch ein eigener Hardware-Beitrag geleistet: Die MCP-Detektoren für das Echelle-Spektrometer wurden am AIT entwickelt und auch gebaut, sowie die zugehörige Auswerte-Elektronik und der Bordrechner zur Steuerung der Detektoren und der Datenerfassung. *ORFEUS* wurde auf dem wiederverwendbaren deutschen Satelliten *ASTRO-SPAS* (***S**huttle **Pa**llet **S**atellite*) der damaligen Firma MBB (inzwischen Teil der Fa. Astrium) eingesetzt und flog mit diesem in zwei Missionen 1993 (4 Tage Beobachtung) und 1996 (14 Tage Beobachtung) mit einem *Space Shuttle* ins All. Während der ersten Mission wurden mit dem Echelle-Spektrometer leider keine Daten gewonnen (hauptsächlich wegen eines ausgefallenen Umlenkspiegels), insgesamt war aber bereits diese Mission sehr erfolgreich, weil mit dem zweiten, an der Universität in Berkeley gebauten Spektrometer sehr viele Messungen durchgeführt werden konnten. Die zweite *ORFEUS*-Mission war ein großer Erfolg und hat während des 14 Tage dauernden Freifluges des Satelliten eine sehr große Zahl von Fern-Ultraviolett-Spektren (*FUV*) im Wellenlängenbereich von 90 - 140 nm mit einer spektralen Auflösung von 10.000 beobachten können (mit 17,7 Tagen im All war es auch der längste Shuttle-Flug überhaupt).Einzelheiten zu diesem Projekt findet man auf unseren Webseiten unter `http://www.uni-tuebingen.de/de/4221`.

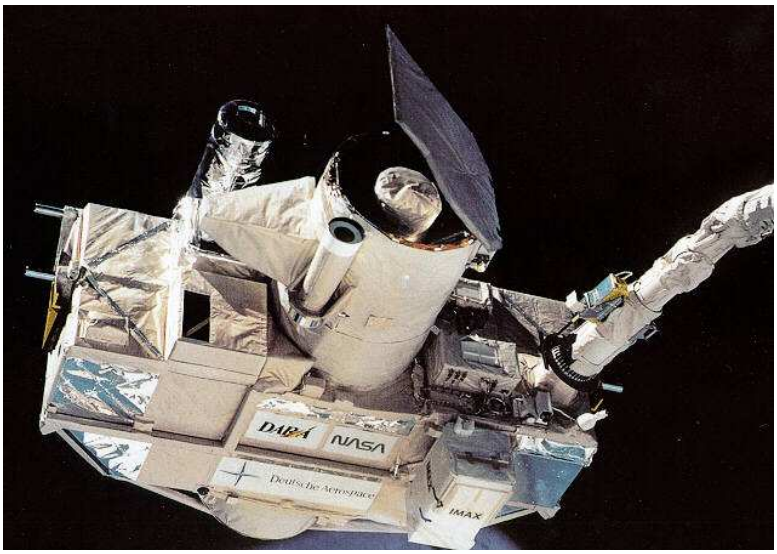

Abb. 1.1
ORFEUS während der ersten Mission 1993 (Foto: NASA)

Realtiv schnell nach den beiden Flügen war klar, dass *ORFEUS* nicht noch einmal ins All fliegen würde. Inzwischen ist der *ASTRO-SPAS*-Satellit im Deutschen Museum in München, und das Teleskop und das Echelle-Spektrometer sollen in Zukunft in der Abteilung Astronomie im Sand 1 ausgestellt werden und zu besichtigen sein. Die Detektoren sind nach wie vor voll funktionsfähig und werden nun für dieses Praktikum eingesetzt. Gleichzeitig arbeiten wir daran, uns an künftigen Weltraumprojekten wieder mit solchen Detektoren zu beteiligen.

In diesem Praktikumsversuch werden wir uns mit den Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten dieser Detektoren beschäftigen.

Hinweise zur Vorbereitung

Um Ihnen die Vorbereitung des Versuchs zu vereinfachen, haben wir in diese Einleitung einfache Aufgaben eingestreut. Sie sollten diese Aufgaben **vor dem Praktikum** gelöst haben, sie werden vor dem Versuch im Rahmen des Testats durchgesprochen. Die Lösung ist Teil Ihres Praktikumsprotokolls.

Diese Anleitung wurde recht ausführlich gehalten, um auch ausreichende Hintergrundinformationen zum Versuch zu liefern. Folgende Kapitel sind für das Verständnis des Versuchs nicht unbedingt notwendig und können bei knapper Vorbereitungszeit übersprungen werden: 1.2, 2.2.1, 2.3.3, 2.3.5, 3.4, 3.5, 3.6. **Lesen Sie aber insbesondere Kap. 4.13, S. 53 schon vor der Versuchsdurchführung!**

Auch ist es für Sie hilfreich, wenn Sie sich vor dem Praktikum mit den Funktionen von Excel vertraut gemacht haben, da ein Teil der Datenauswertung damit vorgenommen wird.

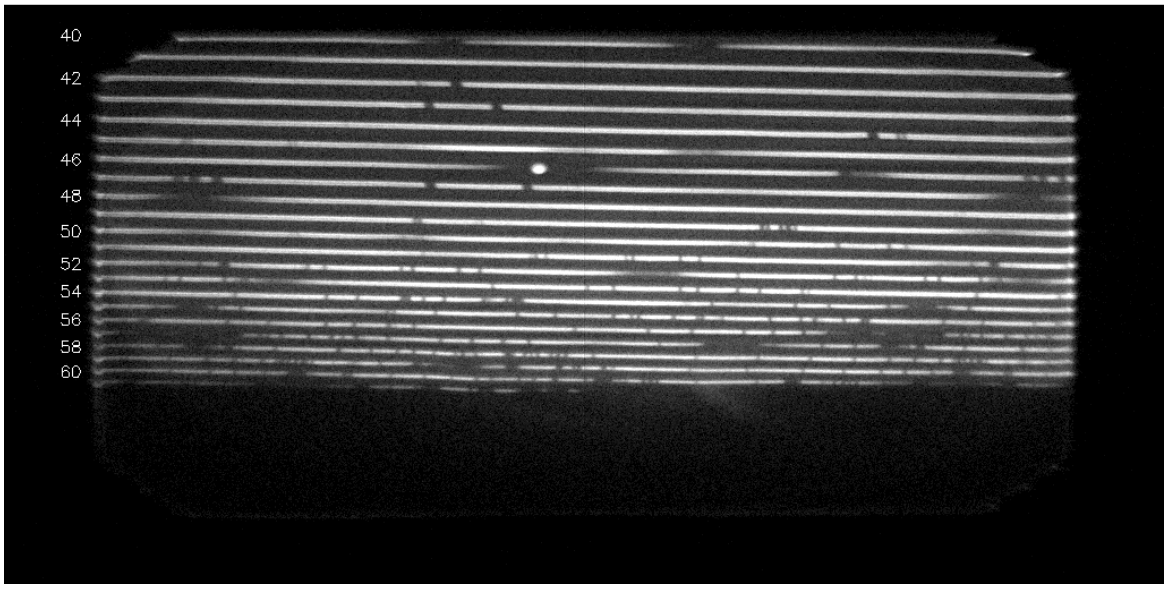

Abb. 1.2
Echelle-Spektrum des Weißen Zwergs HD 93521. Links sind die Ordnungen des Echelle-Gitters nummeriert, beginnend bei Ordnung 40 mit einer Wellenlänge von ca. 140 nm (links oben).

1.2 Ergebnisse des Echelle-Spektrometers der ORFEUS II Mission

Dieser Abschnitt soll nun kurz ein paar der wichtigsten Ergebnisse vorstellen, die mit dem Echelle-Spektrometer während der zweiten *ORFEUS*-Mission gewonnen wurden.

In Abb. 1.2 ist eine Originalmessung des Echelle-Spektrometers wiedergegeben, ein Spektrum des Weißen Zwerges HD 93521. Das Bild ist nicht quadratisch, da die Daten in X-Richtung (Hauptdispersionsrichtung des Spektrometers) mit 1024 Pixeln aufgezeichnet wurden, in Y-Richtung (Querdispersionsrichtung) aber nur mit 512 Pixeln, was ausreichend war, um die einzelnen spektralen Ordnungen (im Bild nummeriert von 40 bis 60) trennen zu können. Die Wellenlängenskala läuft von ca. 90 nm (Ordnung 61, Bildmitte) bis zu ca. 140 nm (Ordnung 40, links oben).

Ein Echelle-Spektrometer arbeitet mit zwei verschiedenen Gittern. Die hohe spektrale Auflösung wird von einem Echelle-Gitter erzeugt, welches in hohen Beugungsordnungen arbeitet (hier: Ordnungen 40 – 61). Da diese Beugungsordnungen sich überlagern, wird ein zweites Gitter (Querzerleger, engl. *Cross Disperser*) dazu verwendet, um mit geringer spektraler Auflösung eine Dispersion senkrecht zu der des Echelle-Gitters zu erreichen. Dadurch werden die sich überlagernden Ordnungen des Echelle-Gitters auf der Detektorfläche untereinander angeordnet und die einzelnen Ordnungen verlaufen leicht schrägt über die Bildfläche.

In dem Bild sind bereits deutlich die Absorptionslinien als dunkle Bereiche zu sehen. Man kann auch leicht zwei verschiedene Arten von Absorptionslinien erkennen: breite und schmale Linien. Die breiten Linien sind aufgrund des Doppler-Effekts verbreitert. Sie stammen von heißen Gasen und sind daher stellaren Ursprungs (Sternatmosphäre). Die schmalen Linien stammen im Umkehrschluss von kalten Gaswolken, die sich daher im interstellaren Raum befinden müssen, also irgendwo zwischen der Erde und dem beobachteten Stern. Bei genauem Hinsehen lassen sich sogar einige doppelt vorhandene schmale Absorptionslinien erkennen. Es handelt sich dabei um dopplerverschobene Linien. Das bedeutet, dass das Licht durch zwei verschiedene Gaswolken gelaufen ist, welche sich mit unterschiedlichen Geschwindig-

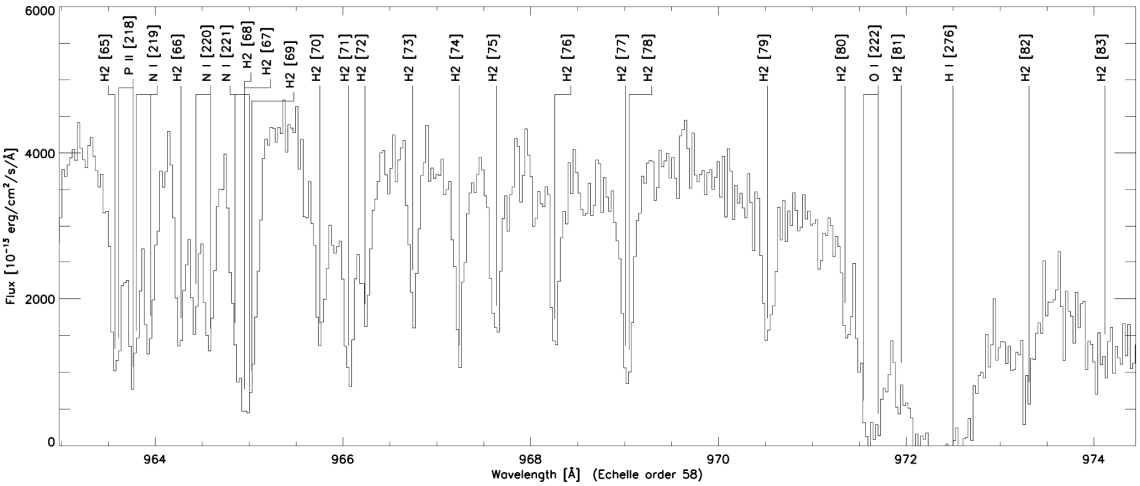

Abb. 1.3
Ausschnitt aus dem Echelle-Spektrum des Weißen Zwergs HD 93521. Die identifizierten Absorptionslinien sind markiert: H2 = molekularer Wasserstoff H_2, O I = neutraler Sauerstoff, N I = neutraler Stickstoff, P II = einfach ionisierter Phosphor, H I = neutraler Wasserstoff (Linie der Lyman-Serie, Lyman-γ = 972.537 nm, stellare Linie). (Quelle: Barnstedt et al. 2000)

keiten relativ zur Erde bewegen. Die Abb. 1.3 zeigt einen absolutkalibrierten Plot von einem Ausschnitt aus diesem Spektrum mit einer Reihe von identifizierten Absorptionslinien. Insgesamt wurden über 300 verschiedene Absorptionslinien in diesem Spektrum identifiziert (Barnstedt et al. 2000). Besonders markant ist die Vielzahl von fast 200 Absorptionslinien des molekularen Wasserstoffs H_2 in diesem Spektrum, die aus mindestens zwei verschiedenen interstellaren Gaswolken stammen. H_2 lässt sich praktisch nur in diesem *ORFEUS*-Wellenlängenbereich beobachten. Sogar in manchen Sternatmosphären können Wasserstoffmoleküle H_2 und deren Ionen H_2^+ nachgewiesen werden. Diese bei höherem Gasdruck in der Atmosphäre gebildeten Moleküle sind kurzlebig und werden deshalb auch Quasi-Moleküle genannt. Mit *ORFEUS* konnten sie zum ersten Mal im Wellenlängenbereich unterhalb von 120 nm vermessen werden.

Auch in Spektren von Sternen in den beiden Magellanschen Wolken konnte kaltes H_2 nachgewiesen werden. Die absorbierenden Gaswolken sind Hochgeschwindigkeitswolken im Halo unserer Milchstraße, haben also mit den Magellanschen Wolken selbst nichts zu tun. In einem Fall wurden sogar Absorptionslinien von hochangeregten Zuständen beobachtet, die auf eine Durchstrahlung des Gases mit UV-Licht hindeuten. Solch hohe Anregungen von H_2 wurden mit *ORFEUS* zum ersten Mal beobachtet.

Neben Wasserstoff konnte in den Spektren einiger Objekte auch Deuterium gefunden werden. Deuterium wurde beim Urknall erzeugt und später in der Kernfusion in den Sternen verbraucht, daher wird im Laufe der Entwicklung des Universums Deuterium immer weniger. Mit *ORFEUS* konnte die Häufigkeit von interstellarem Deuterium in Richtung zweier Sterne bestimmt werden – zum ersten Mal aus 5 oder 6 Absorptionslinien. Damit war eine Bestimmung des interstellaren D/H-Verhältnisses möglich. Die Werte lagen im Rahmen der bisher bekannten Messungen.

Aus Spektren der Großen Magellanschen Wolke konnte eine Untergrenze für das H_2/CO-Verhältnis bestimmt werden. CO ist im Weltall sehr häufig und kann im Gegensatz zu H_2 auch im Radiobereich beobachtet werden. CO kann daher im Weltall sehr gut beobachtet werden und man vermutet, dass H_2 überall da vorhanden ist, wo auch CO vorhanden ist. Daher ist eine direkte Bestimmung des H_2/CO-Verhältnisses wichtig, um von den CO-Messungen auf die H_2-Menge schließen zu können.

Durch Beobachtung von Emissionslinien von 5-fach ionisiertem Sauerstoff (O VI, nur im *ORFEUS*-Wellenlängenbereich sichtbar) in symbiotischen Sternen konnte direkt gezeigt werden, dass diese Strahlung über Raman-Streuung Emissionslinien im sichtbaren Spektralbereich erzeugt. Die Sauerstoff-Emissionslinien werden von Wasserstoff über die Lyman-α-Linie absorbiert und die überschüssigen Energien tauchen als Emissionslinien im sichtbaren Bereich auf. Der Mechanismus war bereits bekannt, konnte aber nun zum ersten Mal direkt beobachtet werden.

Mit der Beobachtung von O VI lassen sich generell sehr heiße Gase von etwa 200 000 K nachweisen. Mit *ORFEUS* gelang dieser Nachweis auch für Gaswolken im Halo unserer Galaxis.

Schließlich konnten auch zum ersten Mal HD-Moleküle in Spektren der Kleinen Magellanschen Wolke beobachtet werden.

Eine etwas ausführlichere Darstellung findet sich auf dieser Webseite:
`http://www.uni-tuebingen.de/de/4319`

2 Funktionsprinzip der MCP-Detektoren

2.1 Einleitung

Bei den hier behandelten Detektoren handelt es sich um photonenzählende, abbildende Detektoren. Sie registrieren einzelne Photonen, bestimmen zu jedem Photon den Auftreffpunkt auf der Bildfläche und speichern die Photonenkoordinaten in einem Computer ab.

Die wesentlichen Bestandteile der Detektoren sind Mikrokanalplatten (engl. *Micro Channel Plate*, MCP) und eine Keil-Streifen-Anode (engl. *wedge-and-strip anode*, WSA).

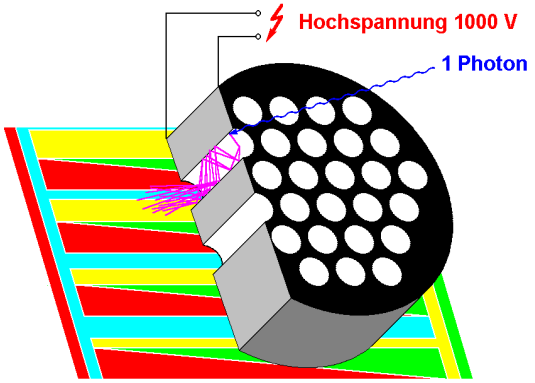

Abb. 2.1
Prinzip des MCP-Detektors

MCPs sind Platten mit mikroskopisch kleinen gebündelten Elektronenvervielfacher-Kanälen. Sie bestehen aus Glas. Die Ober- und Unterseite der Mikrokanalplatten sind mit metallischen Elektroden versehen. Dort wird eine Spannung von typisch 1000 V angelegt. Die inneren Kanaloberflächen sind halbleitend beschichtet. Der schwache Strom durch die Kanaloberfläche bewirkt ein homogenes elektrisches Feld im Kanal. Ein auf die Kanaloberfläche auftreffendes UV-Photon kann dort ein Photo-Elektron auslösen (unter Vakuum). Durch die hohe Feldstärke im Kanal wird das Elektron zur Rückseite der Mikrokanalplatte hin beschleunigt. Dabei wird es wieder auf die Kanalwand treffen und kann dort mehrere Elektronen auslösen. So entsteht in dem Elektronenvervielfacher-Kanal schließlich eine Elektronenlawine, die als Elektronenwolke aus der Rückseite der Mikrokanalplatte austritt. Aus einem Kanal können so etwa 10^4 Elektronen austreten.

Die Elektronenwolke trifft nach Austritt aus der Mikrokanalplatte auf die Keil-Streifen-Anode. Diese Anode besteht aus einer Goldschicht auf einer Quarzplatte, in die ein Muster aus 4 ineinander greifenden Leiterbahnen geätzt wurde. Dieses Muster ist so beschaffen, dass die auftreffende Elektronenwolke sich auf alle 4 Leiterbahnen verteilt. Aus den Verhältnissen der Elektronenmengen, die die 4 Leiterbahnen erhalten haben, lässt sich anschließend der Ladungs-Schwerpunkt der Elektronenwolke bestimmen. Damit hat man auch die Auftreffkoordinaten des registrierten Photons.

Die Ladungsmengen werden mit schnellen empfindlichen Ladungsverstärkern elektronisch verstärkt und als bipolare Spannungsimpulse vom Detektor zur Auswerte-Elektronik übertragen. Dort werden die Maximalausschläge der Spannungsimpulse mit Analog-Digital-Wandlern digitalisiert. Die weitere Verrechnung der vier Ladungsmengen-Werte zur Photonenkoordinate erfolgt dann digital. Der Datenerfassungsrechner empfängt die digitalen Photonenkoordinaten und speichert sie ab.

2.2 Mikrokanalplatten (MCPs) und Elektronenvervielfacher-Kanäle

Die folgenden Abschnitte behandeln Herstellung, Funktion und Eigenschaften von MCPs und Elektronenvervielfacher-Kanälen.

2.2.1 Herstellung von MCPs

Mikrokanalplatten werden aus Glasbündeln in Glasfibertechnologie hergestellt. Der Ausgangs-Glasstab enthält zwei Glassorten:

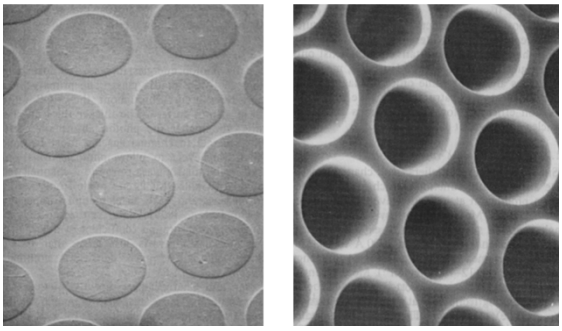

Abb. 2.3
Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer MCP-Oberfläche vor (links) und nach (rechts) dem Herausätzen der Kanäle (Quelle: Wiza, 1979)

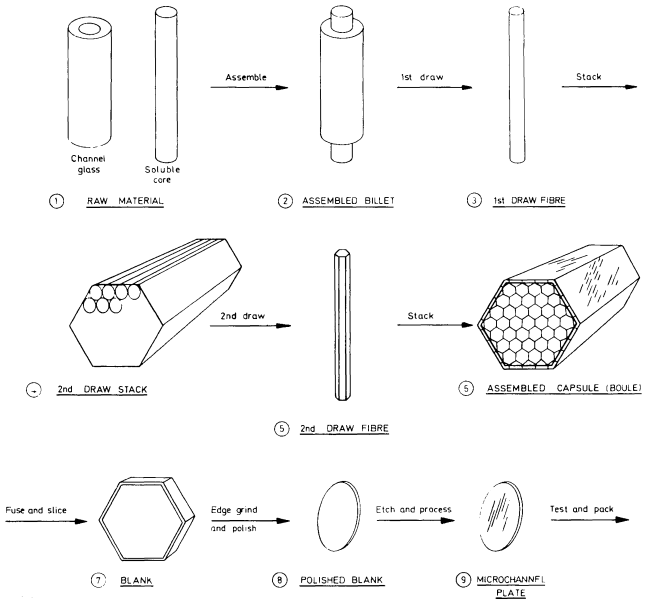

Abb. 2.2
Schritte der MCP-Herstellung (Quelle: VALVO, Technische Informationen für die Industrie, Microchannel plates, 1976)

der innere Kern besteht aus einer ätzbaren Glassorte, während der äußere Mantel aus einer nicht ätzbaren Glassorte besteht. Solche Glasstäbe werden zunächst zu dünnen Strängen von etwa 0,8 mm Durchmesser auseinander gezogen, zu sechseckigen Bündeln zusammengeschmolzen und nochmals auseinander gezogen, so dass sich der Querschnitt weiter verringert. Diese Sechseckstränge werden erneut gebündelt und unter Vakuum verschweißt (siehe auch Abb. 2.2).

Aus dem resultierenden Glasblock werden die künftigen MCPs herausgeschnitten, poliert und schließlich wird der ätzbare Anteil herausgeätzt, so dass die Kanäle entstehen. Diese Kanäle haben typisch einen Durchmesser von 12,5 µm, mit einem Mitte-Mitte-Abstand von 15 µm. Auch Kanaldurchmesser von 8 µm oder sogar 4 µm werden heute realisiert. Durch Behandlung in einer heißen Wasserstoffatmosphäre entsteht in den Kanälen eine halbleitende Oberfläche, welche die gewünschte Sekundärelektronen - Emissionscharakteristik aufweist. Unter Vakuum werden schließlich

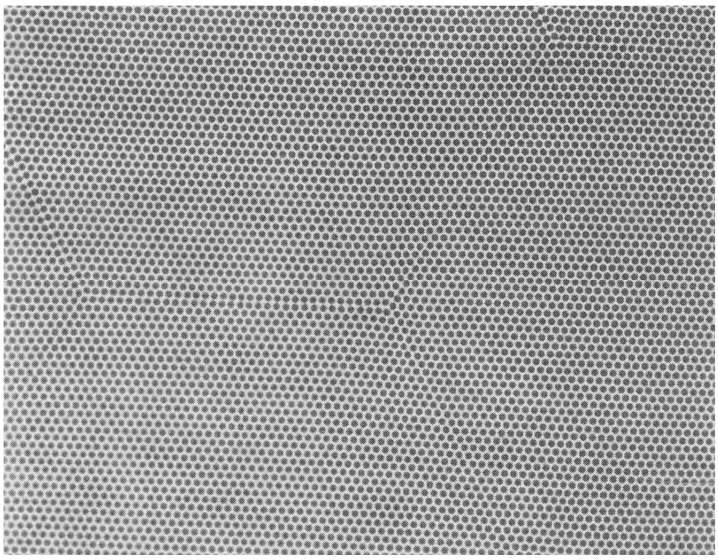

Abb. 2.4
Mikroskopische Ansicht einer MCP-Oberfläche. Die Grenzen der Sechseck-Bündel sind hier deutlich sichtbar. (Quelle: Vallerga et al., 1989)

auf die beiden Seiten der MCP Metall-Elektroden aufgedampft, die den elektrischen Kontakt zu den einzelnen Kanälen herstellen.

Abb. 2.5
Verschiedene Channeltron-Typen (Quelle: Galileo Electro-Optics Corporation)

2.2.2 Elektronenvervielfacher-Kanäle

Jeder einzelne Kanal einer MCP arbeitet nach dem Prinzip eines Elektronenvervielfacher-Kanals. Die einfallende Primärstrahlung löst am Anfang eines Kanals ein Sekundärelektron aus, welches im Kanal durch die angelegte Hochspannung beschleunigt wird und beim erneuten Auftreffen auf die Kanalwand dort 2 oder mehr Elektronen auslösen kann (Abb. 2.6). So entsteht im Kanal eine Elektronenlawine, die am Ende des Kanals austritt und als Ladungsimpuls elektronisch nachgewiesen werden kann. So genannte Channeltrons arbeiten nach diesem Prinzip (Abb. 2.5). Deren Kanaleingang ist in der Regel trichterförmig aufgeweitet zur Vergrößerung der empfindlichen Fläche und der Kanal selbst ist kreisförmig gebogen, um das Ionenfeedback zu verhindern. Beim Ionenfeedback werden die von der Elektronenwolke am Ausgang erzeugten Ionen des Restgases durch den Kanal zurück bis zum Eingang beschleunigt, wo sie wieder neue Impulse auslösen können. Das führt zu einem instabilen Verhalten und ist daher unerwünscht. Gebogene Kanäle verhindern, dass die Ionen bis zum Kanaleingang zurückfliegen können und somit kann auch kein Ionenfeedback stattfinden.

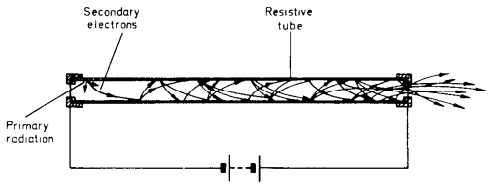

Abb. 2.6
Elektronenvervielfacherkanal (Quelle: VALVO, Technische Informationen für die Industrie, Microchannel plates, 1976)

2.2.3 MCP-Konfigurationen

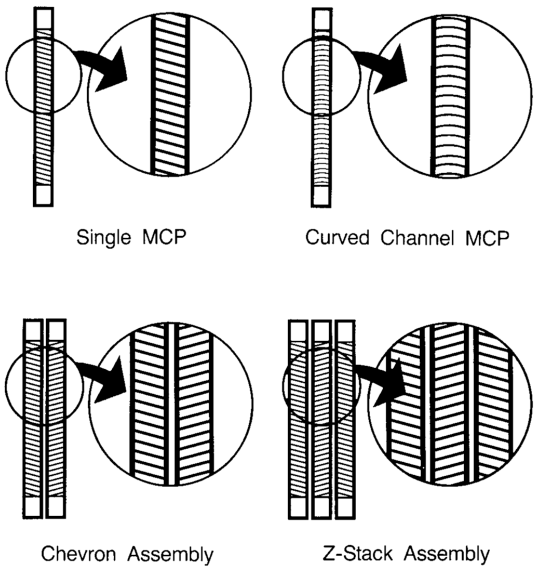

Abb. 2.7
MCP-Konfigurationen (Quelle: Galileo Electro-Optics Corporation)

Es gibt auch MCPs mit gebogenen Kanälen (*Curved Channel MCP*), die eine höhere Verstärkung als normale MCPs ermöglichen, ohne dass ein Ionenfeedback auftritt. Üblicherweise aber benutzt man mehrere MCPs hintereinander, um eine höhere Verstärkung zu erreichen. Dabei sind die Kanäle der MCPs gegen die Oberflächennormale geneigt (8° - 15°) und die Kanäle der hintereinander liegenden MCPs sind entgegenge-

Konfiguration	Max. Spannung	Verstärkung	Impulshöhenverteilung
Einzel-MCP	1000 V	10^3-10^4	exp. abfallend
Curved Channel	2400 V	10^5-10^6	50% FWHM
Chevron Konf.	2000 V	10^6-10^7	120% FWHM
Z-Konfiguration	3000 V	10^7-10^8	80% FWHM

Tabelle 2.1
Eigenschaften der MCP-Konfigurationen (Quelle: Galileo Electro-Optics Corporation)

setzt geneigt. Bei 2 MCPs spricht man dann von einer Chevron-Konfiguration und bei 3 MCPs von einer Z-Konfiguration (Abb. 2.7). Durch die gewinkelte Anordnung der Kanäle wird das Ionenfeedback wirksam verhindert.

Aufgabe 1:

Nennen Sie zwei Gründe dafür, dass MCPs nur unter Vakuum betrieben werden können. (Was würde passieren, wenn man eine MCP unter Atmosphärendruck zu betreiben versucht?)

2.2.4 Verstärkung und Impulshöhenverteilung

Einzelne MCPs werden am besten in einem Analog-Modus betrieben. Dabei wird der Ausgangs-Strom der MCPs registriert, der einfach proportional zum einfallenden Photonenstrom ist. Einzelne Photonen lassen sich so nicht nachweisen, der Modus entspricht dem eines konventionellen Photomultipliers im Analog-Betrieb. Analysiert man die einzelnen Impulse in diesem Betrieb, so stellt man fest, dass die Impulshöhen einer exponentiell abfallenden Verteilung folgen (Tabelle 2.1), d.h. schwache Impulse sind sehr häufig, während starke Impulse sehr selten sind.

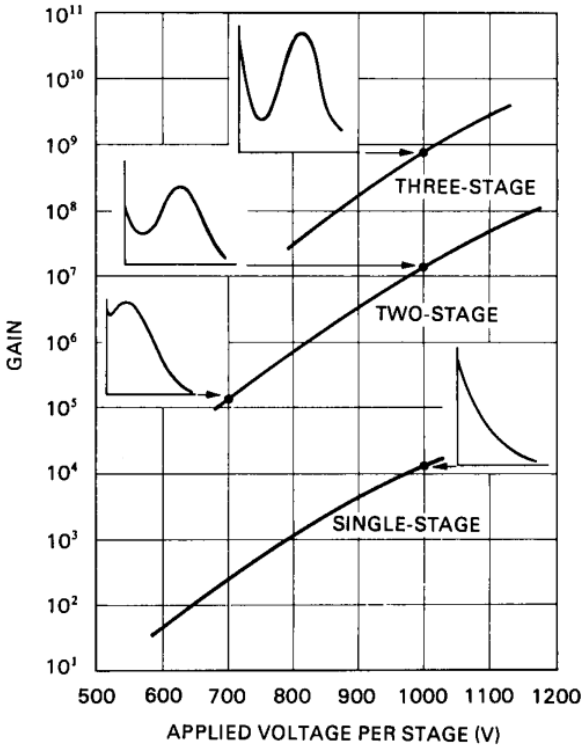

Abb. 2.8
Zusammenhang zwischen Verstärkung, Impulshöhenverteilung, Spannung und MCP-Konfiguration (Quelle: Hamamatsu)

Für einen Zählmodus, in dem möglichst alle einzelnen Ereignisse registriert werden können, benötigt man eine Konfiguration, die eine im Idealfall feste Impulshöhe für jedes Ereignis liefert. In der Praxis hat man es mit Impulshöhenverteilungen zu tun, die ein mehr oder weniger ausgeprägtes Maximum besitzen. Solche Impulshöhenverteilungen erreicht man nur mit sehr hohen Verstärkungen. Dann wird nämlich die Elektronendichte am Ausgang des Kanals so groß, dass sich ein Gegenfeld im Kanal aufbaut, so dass die Elektronen keine weitere Energie gewinnen und somit die Elektronenlawine nicht weiter zunimmt. Es kommt also zur Sättigung der Verstärkung eines Kanals. Deshalb enthalten alle Impulse in etwa die gleiche Ladungsmenge. Zur Charakterisierung einer solchen Impulshöhenverteilung verwendet man die Halbwertsbreite FWHM, die Breite der Verteilung in der Höhe des halben Maximalwerts (Abb. 2.9). Üblicherweise bezieht man die Angabe der FWHM-Breite auf die wahrscheinlichste Verstärkung (*modal gain*, Peak-Position) und gibt die Breite in Prozent dieses Wertes an. Der Prozentwert kann dabei sowohl

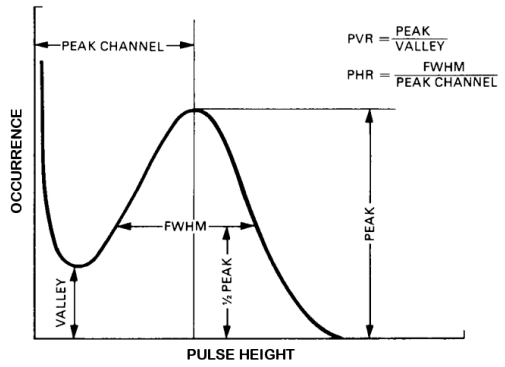

Abb. 2.9
Impulshöhenverteilung: Definition der Halbwertsbreite *Full Width at Half Maximum*, FWHM (Quelle: Hamamatsu)

größer als auch kleiner 100% sein. Alternativ kann sich die Prozentangabe auch auf die mittlere Verstärkung (*mean gain*) beziehen – das sollte jeweils angegeben werden, denn bei asymmetrischen Verteilungen sind die Werte nicht identisch.

Kleine Breiten der Verteilung sind deshalb erwünscht, weil dann die Triggerschwelle der Zähl-Elektronik so eingestellt werden kann, dass sie deutlich über der Rauschschwelle liegt, aber trotzdem praktisch alle Impulse erfassen kann.

2.2.5 Empfindlichkeit

Abb. 2.10 zeigt Details der Oberflächenbeschaffenheit der MCP-Kanäle. Elektronen können aus einer Tiefe von bis zu 200 Å (20 nm) ausgelöst werden. MCPs sind daher empfindlich für ionisierende Strahlung mit einer Eindringtiefe zwischen 1 nm und 20 nm. Dazu gehören UV- und Röntgenstrahlung, sowie Elektronen und Ionen. Bei UV-Strahlung liegt die Grenze etwa bei einer Wellenlänge von 150 nm (rund 8 eV), für Photonen geringerer Energie fällt die Empfindlichkeit rapide ab. Bei Röntgenstrahlung liegt die hochenergetische Grenze bei etwa 0,1 nm (12.400 eV). Hochenergetischere Röntgenphotonen dringen tiefer als 20 nm ein und lösen daher kaum noch Photoelektronen aus (Abb. 2.11).

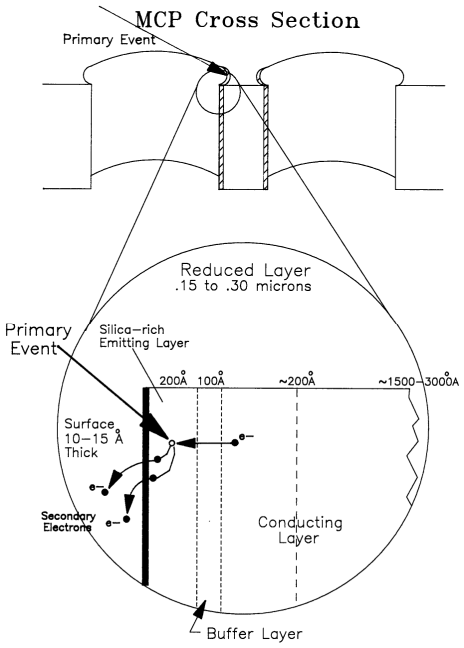

Abb. 2.10
Detail der Oberfläche eines MCP-Kanals (Quelle: Galileo Electro-Optics Corporation)

Die Eigenschaft, dass MCPs nicht für sichtbares Licht empfindlich sind, bezeichnet man als *solar blind*. Dies ist für UV- oder Röntgen-Detektoren in der Raumfahrt eine sehr wesentliche Eigenschaft. Sonnenlicht ist häufig als Streulicht in der Optik der Instrumente vorhanden. Dabei ist der Photonenstrom des Streulichts in der Regel um viele Größenordnungen höher als der der zu messenden Strahlung. Somit ist die Streulichtunterdrückung ebenso wie die Eigenschaft der Detektoren *solar blind* zu sein, eine wesentliche Voraussetzung, um schwache UV- oder Röntgenstrahlung von anderen Himmelsquellen nachweisen zu können.

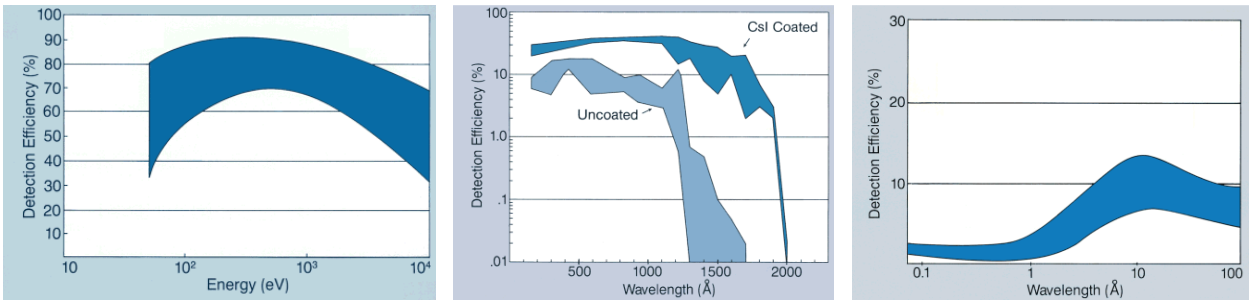

Abb. 2.11
Empfindlichkeit der MCPs für Elektronen (links), UV-Photonen (Mitte, mit und ohne CsI-Photokathode) und Röntgen-Photonen (rechts) (Quelle: Galileo Electro-Optics Corporation)

Die Empfindlichkeit für UV-Photonen lässt sich durch Photokathoden steigern. In der Regel wird das Photokathodenmaterial direkt auf die MCP-Oberfläche aufgebracht. Wichtige Photokathodenmaterialien sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Material	**langwellige Grenze [nm]**
Kalium-Bromid (KBr)	155
Cäsium-Jodid (CsI)	200
Rubidium-Tellurid (Rb_2Te)	300
Cäsium-Tellurid (Cs_2Te)	350

Tabelle 2.2
Photokathoden-Materialien

Ein Nachteil der Photokathoden ist, dass sie unter normalen Atmosphären-Bedingungen nicht stabil sind. Sie sind hygroskopisch und reagieren z.T. auch mit Sauerstoff. Als Faustregel gilt, dass die Materialien umso empfindlicher gegen Umwelteinflüsse sind, je langwelliger die Lichtempfindlichkeitsgrenze ist. So kann KBr für etliche Stunden an Luft gelagert werden, bevor eine Degradation einsetzt. Bei CsI sind es einige Minuten, während Rb_2Te und Cs_2Te überhaupt nicht mehr mit Luft in Berührung kommen dürfen.

Eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit kann dadurch erreicht werden, dass man vor der MCP ein elektrisches Feld anbringt. Das bewirkt, dass Photoelektronen, die auf den Stegen zwischen den Kanälen der MCP erzeugt werden, zurück in die Kanäle gelenkt werden. Ohne dieses elektrische Feld würden diese Photoelektronen nach außen davonfliegen. Auf diese Weise erhöht sich die Quantenausbeute des Detektors um etwa 30 %. Das elektrische Feld wird beim *ORFEUS*-Detektor durch ein vor den MCPs gespanntes Gitter erzeugt, welches selbst etwa 10 % der Photonen zurück hält. So bleiben immer noch 20 % Gewinn an Empfindlichkeit durch das Gitter.

2.2.6 Dunkelstrom

Auch vollkommen unbeleuchtete MCPs erzeugen Impulse. Diese Dunkelstrom-Impulsrate beträgt typischerweise etwa 0,2 - 1 Impuls / s cm^2. Etwa 90 % des Dunkelstroms werden durch den radioaktiven Zerfall von Bestandteilen des MCP-Glases hervorgerufen (β-Zerfall von ^{40}K, Halbwertszeit $1{,}28 \cdot 10^9$ Jahre, Fraser 1989). Da die Dunkelstromimpulse nicht nur am Anfang eines Kanals, sondern an beliebigen Stellen ausgelöst werden können, weist die Impulshöhenverteilung des Dunkelstroms kein Maximum auf, sondern verläuft etwa exponentiell abfallend.

2.2.7 Die MCPs des ORFEUS-Detektors

Bei den MCPs für den ORFEUS II - Detektor handelt es sich um Sonderanfertigungen der Fa. Hamamatsu Photonics. Es werden drei hintereinander geschaltete MCPs in Z-Konfiguration verwendet. Damit wird eine Verstärkung von 10^7 bis 10^8 Elektronen pro Photon erreicht. Die ersten beiden MCPs haben eine Dicke von 1,0 mm und die dritte MCP eine Dicke von 0,6 mm. Der Durchmesser der MCPs beträgt 60 mm und die Kanaldurchmesser 12 µm bei einem Mitte-zu-Mitte Abstand von 15 µm (siehe auch Aufgabe 2). Bei einer Dicke der MCPs (= Länge der Kanäle) von 1 mm beträgt das Verhältnis von Länge zu Durchmesser der Kanäle etwa 80:1. Die erste MCP ist mit einer KBr-Photokathode bedampft. Durch

eine entsprechend geformte MCP-Elektrode wird das Bildfeld des Detektors auf eine Fläche von 40 x 40 mm² begrenzt (Abb. 2.12).

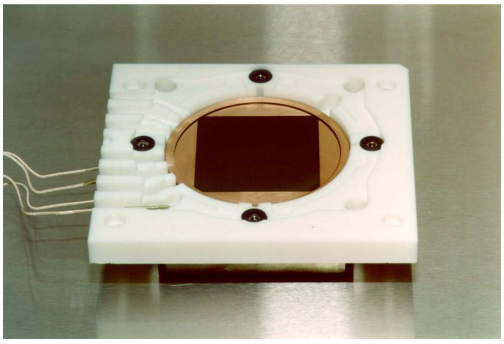

Abb. 2.12
ORFEUS-Detektor: Blick auf die das Bildformat begrenzende rückwärtige Elektrode der ersten MCP. Außerdem ist noch die isoliert dazu montierte erste Elektrode der zweiten MCP zu sehen.

Eine Besonderheit des ORFEUS-Detektors ist, dass die Mikrokanalplatten isoliert gegeneinander mit einem Abstand von etwa 0,3 mm montiert sind. Dadurch ist es möglich, die drei MCPs getrennt mit Hochspannung zu versorgen und auch zwischen den Platten eine Beschleunigungsspannung anzulegen. Über die Spannung der dritten MCP wird die Verstärkung des Detektors geregelt.

Vor den MCPs befindet sich in 1 cm Abstand ein Gitter, welches auf einer Spannung von 500 V liegt. Dieses Gitter sorgt für ein elektrisches Feld von 50 V/mm vor der Photokathode. Dieses elektrische Feld bewirkt, dass Photoelektronen, die auf den Stegen zwischen den Kanälen der MCP erzeugt werden, zurück in die Kanäle gelenkt werden.

Aufgabe 2:

Berechnen Sie den Anteil der Kanalöffnungen an der gesamten Fläche der ORFEUS MCPs (open area ratio, OAR) in Prozent.

2.3 Die Anode

2.3.1 Einleitung

Die Anode befindet sich hinter den MCPs. Sie ist die Auffänger-Elektrode für die aus der MCP austretenden Elektronen. Aufgabe der Anode ist es, die auftreffenden Ladungen so zu kodieren, dass daraus die Ortskoordinaten des auslösenden Photons bestimmt werden können. Die ursprünglich von H.O. Anger (Martin et al., 1981) entwickelte Keil-Streifen-Anode (engl. *Wedge and Strip Anode*, WSA) beruht auf dem Prinzip der Ladungsteilung, so dass aus den registrierten Ladungsverhältnissen die Ortskoordinaten berechnet werden können.

Der Abstand zwischen MCP und Anode beträgt etwa 7 mm. Zwischen MCP und Anode befindet sich ein sehr homogenes elektrisches Feld, welches die Elektronen auf die Anode beschleunigt. Aufgrund des relativ großen Abstands zwischen MCP und Anode weitet sich die Elektronenwolke auf dem Weg von der MCP zur Anode auf. Der Durchmesser der Ladungswolke beträgt beim Auftreffen auf die Anode einige Millimeter.

2.3.2 Das Prinzip der Keil-Streifen-Anode

Eine Keil-Streifen-Anode besteht aus einer auf eine Quarzplatte aufgebrachten Goldschicht, in welche eine periodische Struktur aus vier verschiedenen, ineinander verschachtelten Elektroden eingeätzt ist. Zwei Elektroden sind gegenläufige Keile, während die anderen beiden Elektroden aus komplementären Rechtecken besteht, deren Höhe in der Summe konstant ist, deren Höhenverhältnis jedoch über die Anode

variiert. Abb. 2.13 verdeutlicht, wie durch die Keil-Elektroden die X-Position und durch die Streifen-Elektroden die Y-Position kodiert wird.

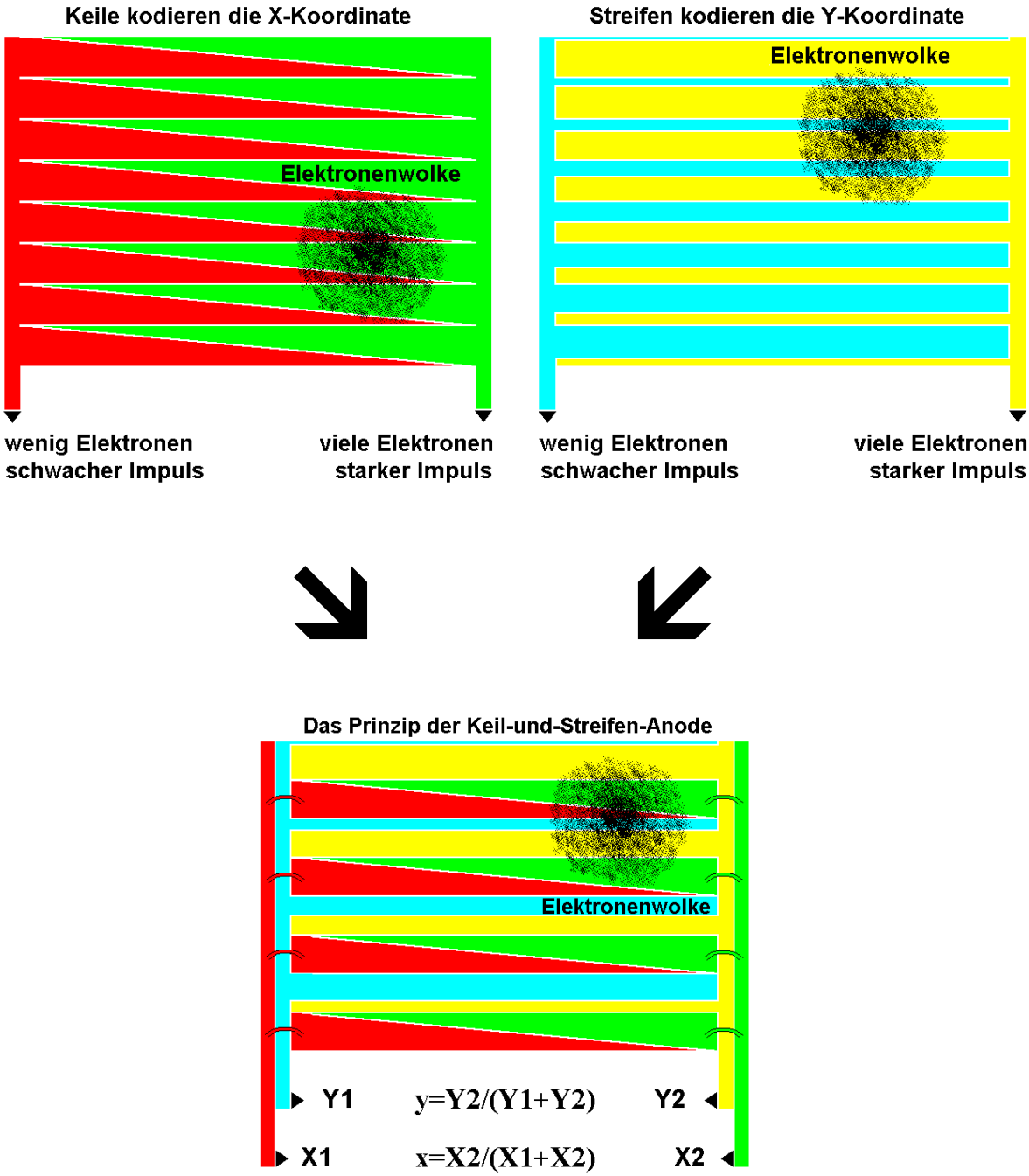

Abb. 2.13
Das Funktionsprinzip einer Keil-Streifen-Anode. Die Ortskoordinaten (x,y) werden aus den Verhältnissen der Ladungen X1, X2, Y1 und Y2 berechnet.

Voraussetzung dafür, dass die Anode die Ortsposition in Y-Richtung linear kodieren kann ist, dass die Breite der Elektronenwolke etwa der doppelten Periodenbreite der Anodenstruktur entspricht. Durch Wahl des richtigen Abstands und der richtigen Feldstärke zwischen Anode und MCP wird dies gewährleistet. Falls die Breite der Wolke zu klein ist, bekommt man periodische Verzerrungen im Bild. Ist die Breite jedoch zu groß, so treten im Randbereich größere Verzerrungen auf.

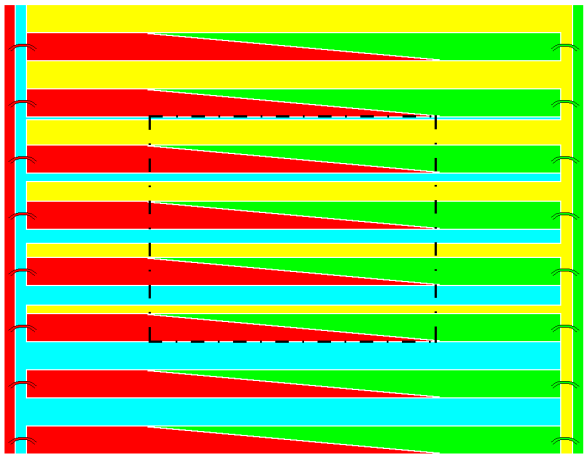

Abb. 2.14
Prinzip einer Keil-Streifen-Anode mit optimiertem Design. Die aktive Anodenfläche ist eingerahmt.

Gänzlich lassen sich die Verzerrungen im Randbereich der Anode natürlich nicht vermeiden. Sie sind durch die unvermeidliche Breite der Elektronenwolke vorgegeben. Bei dem ORFEUS-Detektor wird eine Randverzerrung dadurch umgangen, dass die aktive Anodenfläche linear etwa 10 % größer dimensioniert wurde, als die aktive Breite des Detektorbildfelds. Weiter lassen sich die durch die Breite der Elektronenwolke bedingten Bildverzerrungen dadurch minimieren, dass die Anodenstrukturen über den Rand der aktiven Anodenfläche hinaus mit konstanten Parametern verbreitert werden (Abb. 2.14).

Aufgabe 3:

Für gute Abbildungseigenschaften des Detektors ist es wichtig, die Kapazität der 4 Elektroden untereinander möglichst klein zu halten. Weshalb ist ein Quarz-Substrat für die Anode einem normalen Glas-Substrat vorzuziehen?(Verwendet wurde Quarz der Marke Suprasil.*)*

2.3.3 Alternative Anodendesigns

Ein Nachteil des Anodendesigns ist, dass auf der Anodenoberfläche Kontakte zur Überbrückung von Leiterbahnen angebracht werden müssen. Bei den von uns produzierten Anoden wurde dies durch das aus

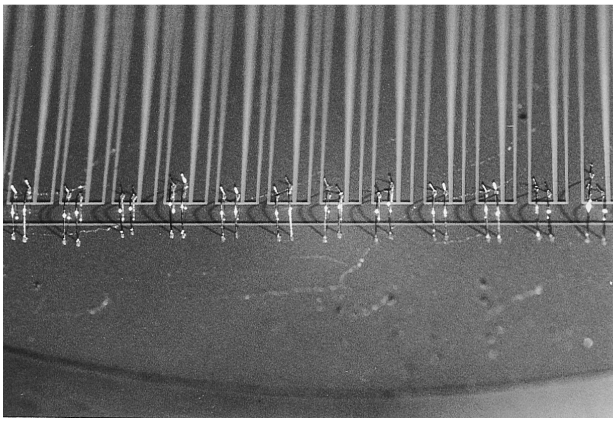

Abb. 2.15
Keil-Streifen-Anode aus einem optischen MCP-Detektor. Sichtbar sind die Bonddrähte, mit denen die Keile mit ihrer Sammelelektrode verbunden sind. (Quelle: Barnstedt 1985)

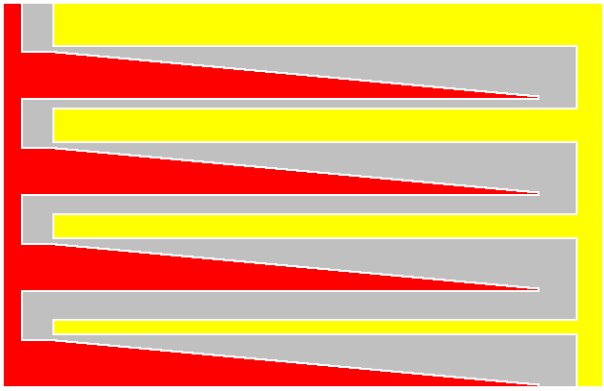

Abb. 2.16
Prinzip einer 3-Elektroden Keil-Streifen-Anode.
Koordinaten-Berechnung:

$$x = 2Q_{Keil} / (\Sigma Q)$$

$$y = 2Q_{Streifen} / (\Sigma Q)$$

der Mikroelektronik bekannte Verfahren der Kontaktierung durch Bond-Drähte bewerkstelligt (Abb. 2.15). Dieses Problem lässt sich vermeiden, wenn man ein 3-Elektroden-Design verwendet. Dabei werden jeweils eine Keil-Elektrode und eine Streifen-Elektrode zu einer gemeinsamen Z-Elektrode zusammengefasst. Diese verläuft mäanderförmig über die Anodenfläche (Abb. 2.16). Bei der Koordinatenberechnung macht man sich zunutze, dass im ursprünglichen 4-Elektroden-Design die beiden Keilflächen zusammen genauso groß sind wie die beiden Rechteckflächen, so dass die Keile und die Streifen jeweils die Hälfte der Gesamtladungsmenge ΣQ erhalten. Nachteil bei diesem 3-Elektroden-Design ist, dass das zuvor beschriebene Verfahren der Optimierung des Anodendesigns zur Minimierung der Randverzerrungen sich hier nicht ohne weiteres anwenden lässt, da die Breite der Z-Elektrode in der oberen linken Ecke praktisch Null wird. Dadurch ist dann der Widerstand der Leiterbahn nicht mehr zu vernachlässigen, was zu neuen Verzerrungen führt.

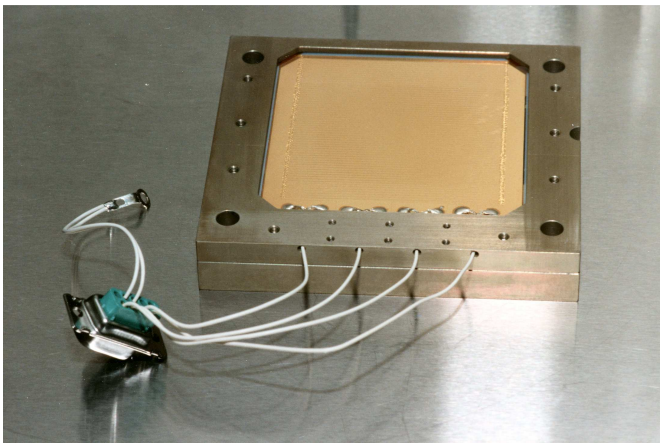

Abb. 2.17
Die Keil-Streifen-Anode des ORFEUS-Detektors.

2.3.4 Die ORFEUS-Anode

Tabelle 2.3 zeigt die technischen Daten der Anode des ORFEUS-Detektors. Die Anode wurde von der Fa. Heidenhain nach unseren Spezifikationen hergestellt. Abb. 2.17 zeigt die ORFEUS-Anode in ihrer Halterung. Die vier elektrischen Anschlüsse wurden mit einem Silberleitkleber auf die Goldschicht aufgeklebt.

Substrat	Quarz (Suprasil)
Abmessungen (Länge x Breite x Dicke)	70 mm x 70 mm x 5 mm
Aktive Fläche	44 mm x 44 mm
Breite der passiven Fläche	7 mm
Periodenbreite (2 Keile + 2 Streifen)	1 mm
Abstand zwischen den Elektroden	20 µm
Leitermaterial	Gold, 2 µm

Tabelle 2.3
Technische Daten der Anode des ORFEUS-Detektors

Die ORFEUS-Anode verfügt auf der Rückseite des Quarzsubstrats über zwei weitere Elektroden von etwa 4 cm² Fläche, die sich an zwei gegenüberliegenden Ecken der aktiven Anodenfläche befinden. Sie bilden eine Kapazität zur Anode, so dass sich darüber rechteckförmige Testimpulse einkoppeln lassen. Die abfallenden Flanken dieser Testimpulse simulieren so das Auftreffen einer Elektronenwolke auf die

Aufgabe 4:

Berechnen Sie die Kapazität einer Testimpuls-Elektrode zur Anode (Dicke der Anode: siehe Tabelle 2.3). Welche Spannung muss ein Testimpuls haben um eine Ladungswolke mit 10^7 Elektronen zu simulieren?

Anode, während die ansteigende Flanke invertierte Impulse erzeugt, deren Auswertung von der Elektronik unterdrückt wird. Die Testimpuls-Elektronik erzeugt wahlweise Impulse auf einer der beiden Elektroden (links unten, LU oder rechts oben, RO) und mit 3 verschiedenen Impulshöhen.

2.3.5 Andere Anodentypen

Der Vollständigkeit halber sollen hier noch kurz weitere ortsauflösende Anoden für MCP-Detektoren vorgestellt werden (ohne Anspruch auf tatsächliche Vollständigkeit).

Widerstandanode

Die Widerstandsanode besteht aus einer homogenen Widerstandsschicht auf einem Trägersubstrat. Sie deckt eine quadratische Fläche ab, die vier Seitenbegrenzungen sind jedoch Kreisbögen aus Linienwiderständen, die einen definierten Widerstand pro Längeneinheit besitzen. An den vier Ecken werden die Ladungen abgegriffen (Abb. 2.18). Aus den Ladungsverhältnissen werden ähnlich wie bei der Keil-Streifen-Anode die Koordinaten des Ladungsschwerpunkts bestimmt. Nachteile der Widerstandsanoden sind:

- Empfindlichkeit gegen Inhomogenitäten des Flächenwiderstands
- Widerstandsrauschen in den Ladungsverstärkern verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis
- Die aktive Anodenfläche lässt sich nicht vollständig für die Abbildung nutzen

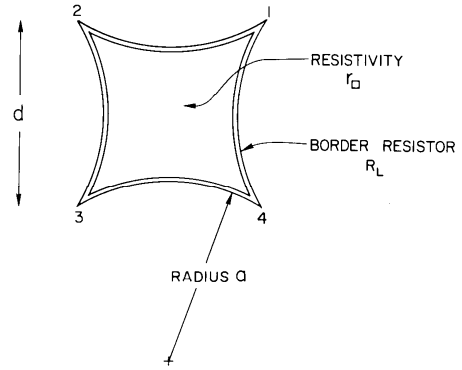

Abb. 2.18
Die Geometrie der Widerstandsanode (Quelle: Lampton et al., 1979)

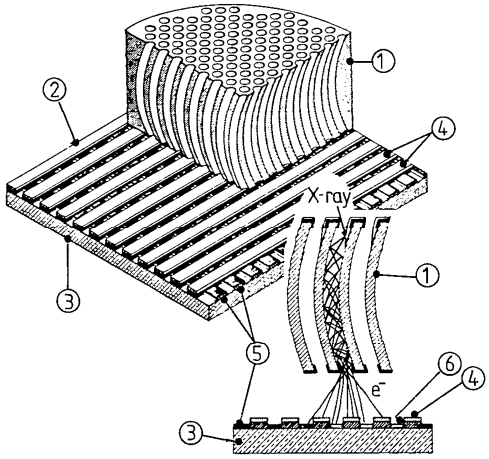

Abb. 2.19
Aufbau eines MAMA-Detektors (Quelle: Fraser, 1989)

MAMA-Detektoren

MAMA-Detektoren (***M**ulti **A**node **M**icrochannel **A**rrays*) verwenden eine MCP mit gekrümmten Kanälen und als Anode ein 2-dimensionales Array aus jeweils 1024 Elektrodenstreifen. Die 1024 Elektroden sind zu 66 Gruppen zusammengeschaltet, so dass für eine 1024 x 1024 Pixel Anode 132 Ladungsverstärker benötigt werden. Eine Koinzidenz-Logik bestimmt aus den gleichzeitig ansprechenden Verstärkern die tatsächliche Ortsposition. Die sehr aufwendige Anodenherstellung und Elektronik machen diesen Detektortyp nur für teure Weltraummissionen interessant. Eingesetzt wird er z.Zt. im *Space Telescope Imaging Spectrograph* (STIS) im *Hubble Space Telescope* (HST) (Danks et al. 1992).

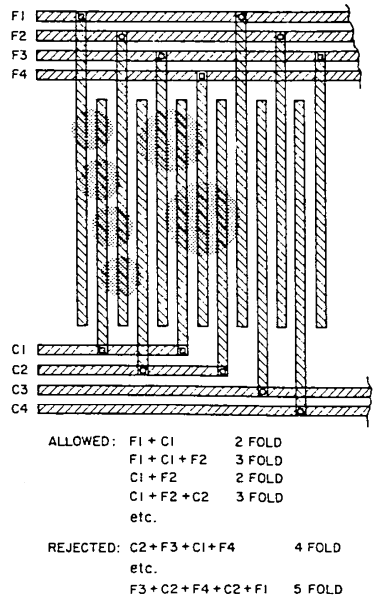

Abb. 2.20
Prinzip der Positionskodierung des MAMA-Detektors (Quelle: Fraser, 1989)

Abb. 2.19 zeigt den Aufbau eines MAMA-Detektors. Legende: ① MCP mit gekrümmten Kanälen, ② Koinzidenz-Anodenarray, ③ Quarz-Substrat, ④ obere Elektroden-Ebene, ⑤ untere Elektroden-Ebene, ⑥ isolierende Schicht aus SiO_2.

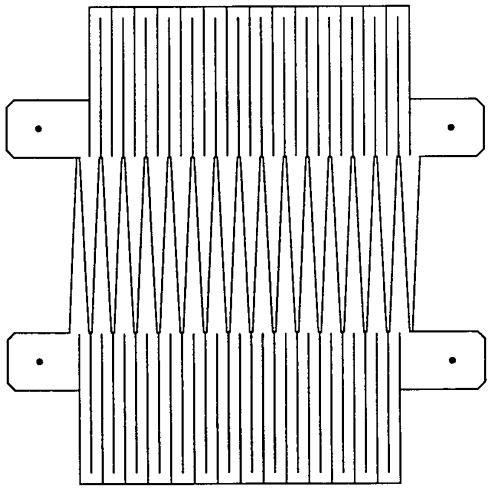

Abb. 2.21
Prinzip einer Double Delay Line Anode (Quelle: Siegmund, 1992)

Delay Line Anoden

Delay Line Anoden beruhen auf dem Prinzip der Verzögerungsleitungen (*Delay Lines*). Verzögerungsleitungen kann man sich als kontinuierliche elektronische RC-Glieder vorstellen. Sie setzen die Signallaufzeit so weit herab, dass sie auf kurzen Strecken messbar wird. Dadurch lässt sich aus der Signallaufzeit die zurückgelegte Strecke bestimmen. Wird in eine Verzögerungsleitung einer bestimmten Länge an einer beliebigen Stelle ein Signal (z.B. eine elektrische Ladung) eingespeist, so kann aus der Differenz der Ankunftszeiten an den beiden Enden der Leitung direkt die Stelle der Einspeisung bestimmt werden. Die Genauigkeit der Ortsbestimmung hängt dabei nur von der charakteristischen Laufzeit des Signals und von der Genauigkeit der Zeitmessung ab, nicht aber von der Länge der Signalleitung.

Die Double Delay Line Anode wurde vom *Space Sciences Laboratory* der Universität Berkeley in Kalifornien entwickelt. Sie ermöglicht eine 2-dimensionale Ortsauflösung, wobei in einer Richtung das Delay Line Prinzip verwendet wird, und in der anderen Richtung das Prinzip einer Keil-Anode. Das hat den Vorteil einer einfachen planaren Anodengeometrie (es werden also keine überkreuzenden Strukturen benötigt wie beim MAMA-Detektor) und bietet in einer Richtung die hohe Ortsauflösung der Delay Line.

Abb. 2.21 zeigt das Layout dieser Anode. Die Y-Richtung wird durch Keilpaare kodiert, so wie bei der Keil-Streifen-Anode. Die Enden der Keile sind jedoch durch RC-Glieder miteinander verbunden. Diese RC-Glieder sind als mäanderförmige Leitungen direkt auf dem Anodensubstrat aufgebracht. Es gibt also zwei Delay Lines, jeweils eine für die oberen und die unteren Keile. Kritisch ist hier natürlich, dass die charakteristische Laufzeit der beiden Delay Lines exakt aufeinander abgestimmt sein muss.

Vorteilhaft werden solche Detektoren dort eingesetzt, wo es nicht direkt auf die Registrierung richtiger Bilder ankommt, sondern eine hohe Ortsauflösung in einer Richtung gewünscht wird, während in der anderen Richtung keine hohen Ansprüche an die Ortsauflösung gestellt werden. Ein typischer Anwendungsfall ist der als Detektor in Spektrographen. Dort wird eine hohe Auflösung in Dispersionsrichtung angestrebt (für eine hohe spektrale Auflösung), während eine geringere Auflösung in der senkrechten Richtung zum Trennen verschiedener spektraler Ordnungen oder für eine einfache Ortsauflösung entlang eines längeren Eintrittsspaltes des Spektrographen ausreicht.

Zum Einsatz gekommen sind solche Detektoren u.a. in dem zweiten Instrument des ORFEUS-Teleskops, dem Berkeley Extrem- and Fern-Ultraviolett Spektrometer (BEFS) (Hurwitz et al., 1988) und in dem FUSE Satelliten.

2.4 Auslese-Elektronik

Aufgabe der Auslese-Elektronik ist es, die Ladungsimpulse aus der Anode zu registrieren und aus deren Verhältnis die Ortsposition des Ladungsschwerpunkts und damit des Ereignisses zu berechnen. Die Elektronik besteht aus den Ladungsverstärkern, die aus den Ladungsimpulsen Spannungsimpulse erzeugen. Diese Spannungsimpulse werden an den Digitalen Positions-Analysator (DPA) weitergeleitet, der die Spannungsimpulse digitalisiert und dann die digitale Berechnung der Ortsposition vornimmt. Die Daten des Ereignisses werden anschließend an einen Computer weitergeleitet.

2.4.1 Zur Theorie der Operationsverstärker

Die in Abb. 2.22 gezeigten dreieckigen Symbole stellen Operationsverstärker dar. Diese Operationsverstärker sind Standardbausteine der Elektronik. Es gibt sie in zahllosen Ausführungen mit optimierten Eigenschaften für die unterschiedlichsten Anwendungen. Die Theorie dieser Operationsverstärker ist jedoch sehr einfach:

Sie besitzen zwei Eingänge und einen Ausgang. Die beiden Eingänge sind mit eine Plus- und einem Minus-Symbol gekennzeichnet („+“: nichtinvertierender Eingang, „–“: invertierender Eingang). Der Ausgang ist die rechte Spitze des Dreiecks. Die theoretische Funktion der Operationsverstärker ist folgende: Sie verstärken die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen mit einem Faktor unendlich (in der Praxis sind es sehr große Verstärkungsfaktoren). Das führt zu einer einfachen Schlussfolgerung: Ein sinnvolles Signal kann am Ausgang der Operationsverstärker nur dann anliegen, wenn die Spannungsdifferenz der beiden Eingänge Null ist, d.h. wenn die beiden Eingänge auf dem gleichen Potential liegen. Aus diesem Grund werden Operationsverstärker in der Regel so beschaltet, dass es eine Rückkopplung vom Ausgang auf den invertierenden Eingang gibt, so dass eine Änderung an der Eingangsspannung wieder kompensiert wird. In einer häufig verwendeten Beschaltung wird der nichtinvertierende (+) Eingang direkt auf Masse gelegt (Nullpotential). Dadurch muss sich der invertierende (–) Eingang so verhalten, dass sich auch dort ein Nullpotential einstellt (virtuelle Masse). Die im Folgenden vorgestellten Ladungsverstärker arbeiten nach diesem Prinzip und sind als Integrator (Tietze/Schenk, Kap. 12.4) aufgebaut.

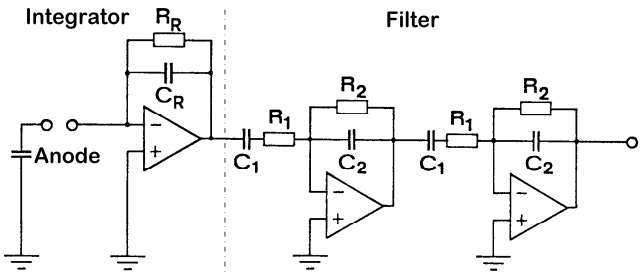

Abb. 2.22
Prinzip der Ladungsverstärker: Integratorschaltung mit Filterschaltung

2.4.2 Ladungsverstärker

Abb. 2.22 zeigt das Prinzipschaltbild der Ladungsverstärker. Die Anode wirkt als Kapazität, die bei Eintreffen eines Impulses eine Ladung erhält. Die Spannung auf der Anodenkapazität macht beim Auftreffen einer Ladung einen Sprung, d.h. beim Eintreffen der Ladung Q wird auf der Anode die Spannung U_{Anode} erzeugt:

$$U_{Anode} = \frac{Q}{C_{Anode}} \qquad (2.1)$$

Die Spannung U_{Anode} ist gleichzeitig die Eingangsspannung U_e des Operationsverstärkers. Der Eingangsoperationsverstärker ist als Integrator geschaltet mit der Rückkoppelkapazität C_R (Widerstand R_R wird zunächst vernachlässigt). Wie zuvor erläutert, stellt sich die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers so ein, dass die Spannungsdifferenz zwischen beiden Eingängen Null ist. Da der nichtinvertierende (+) Eingang auf Masse liegt, muss die Spannung am invertierenden (–) Eingang ebenfalls 0 V betragen. Bei Eintreffen einer Ladung Q auf der Anode muss also am Ausgang des Operationsverstärkers ein Spannungssprung U_a auftreten (siehe Abb. 2.23), der die Anoden-Ladung kompensiert:

$$U_a = -\frac{Q}{C_R} \qquad (2.2)$$

Anschaulich ist es also so, dass die Ladung Q von der Anoden-Kapazität C_{Anode} auf die Rückkoppelkapazität C_R verschoben wird.

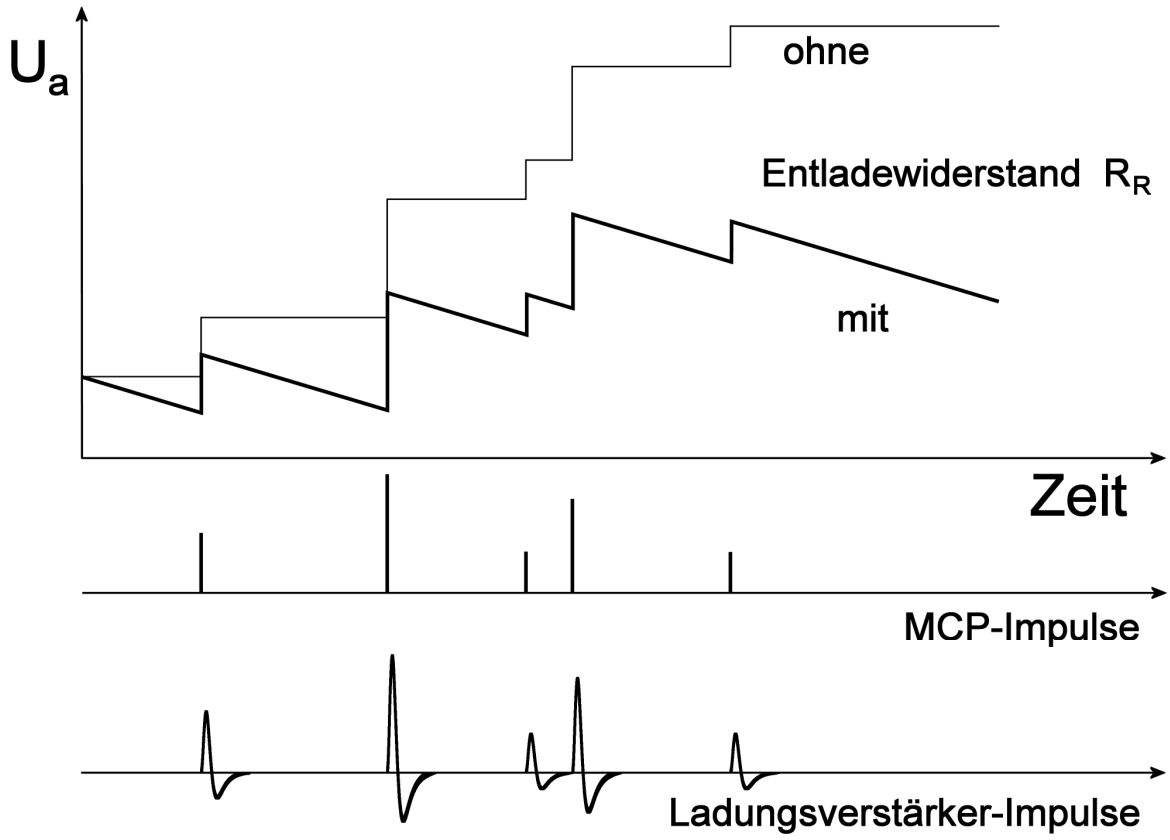

Abb. 2.23
Prinzip der Ladungsverstärkung: Die eintreffenden MCP-Impulse erzeugen am Ausgang der Integratorstufe die Spannung U_a, die mit jedem eintreffenden Impuls sprunghaft ansteigt. Ohne den Rückkoppelwiderstand R_R, der den Kondensator C_R wieder entlädt, würde sich eine ständig ansteigende Ausgangsspannung ergeben, bis die Maximalspannung erreicht ist. Mit dem Entladewiderstand ergibt sich ein sägezahnartiger Verlauf (der lineare Abfall ist der Beginn einer exponentiellen Entladekurve). Die Information über die Ladungsmenge steckt dabei in den Spannungssprüngen. Um diese Information besser verarbeiten zu können, wird eine Filterstufe eingebaut, welche aus den Spannungssprüngen die unten gezeigten bipolaren Impulse erzeugt (siehe auch Abb. 2.24). Die eingeflossenen Ladungsmengen entsprechen nun den Maximumswerten der bipolaren Impulse.

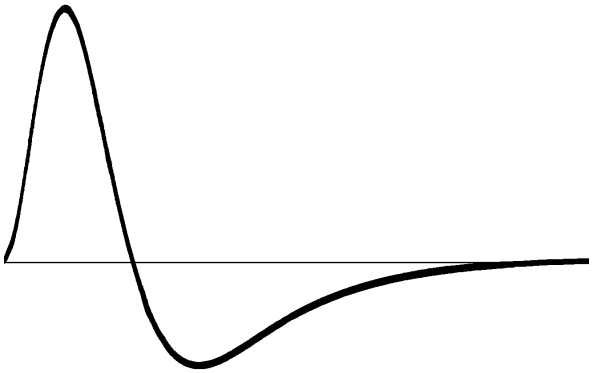

Abb. 2.24
Ausgangsimpulsform nach der Filterstufe: Maximum nach 1,1 µs, Nulldurchgang bei 2,3 µs. Dargestellte Zeitspanne: 10 µs.

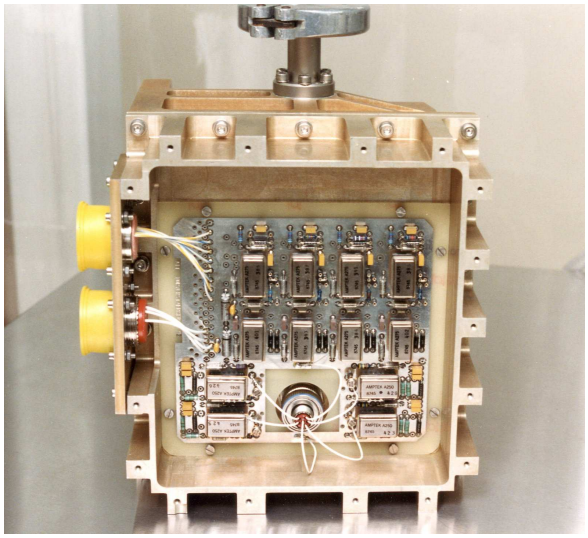

Abb. 2.25
Blick auf die Ladungsverstärker des ORFEUS-Detektors

Aufgabe 5:

Bestimmen Sie aus Gl. (2.2) die Formel für die Ladungsverstärkung der Eingangsstufe (1. Operationsverstärker) des Ladungsverstärkers aus Abb. 2.22 in [Volt/Coulomb]. Berechnen Sie die Ausgangsspannung dieser Integratorstufe für eine Rückkoppelkapazität von C_R = 3 pF bei einer auftreffenden Ladung von 10^7 Elektronen.

Die Eingangsstufe heißt Integrator, weil die Ausgangsspannung proportional zum zeitlichen Integral der einfließenden Ströme ist. Anders ausgedrückt ist die Ausgangsspannung proportional zur Summe der auftreffenden Ladungen. Ohne weitere Maßnahmen würde also die Ausgangsspannung immer weiter ansteigen, je mehr Ladungsimpulse eintreffen. Die Ausgangsspannung würde also sehr schnell an die durch die Versorgungsspannung gesetzten Grenzen stoßen (Abb. 2.23). Um dies zu verhindern, muss die Rückkoppelkapazität langsam entladen und damit die Ausgangsspannung wieder auf 0 V gebracht werden. Das ist die Aufgabe des Rückkoppelwiderstands R_R. R_R ist so groß zu dimensionieren, dass sich U_a in der Zeit, die die Elektronik zur Registrierung eines Impulses benötigt, praktisch nicht verändert. Andererseits muss R_R so klein sein, dass die Spannung U_a bei den höchsten zu erwartenden Impulsraten nicht an den Anschlag laufen kann. Der zeitliche Verlauf der Ausgangsspannung U_a sieht also so aus, dass bei einem eintreffenden Ladungsimpuls ein Spannungssprung stattfindet, dem ein exponentieller Abfall folgt. Je nach Zeitdauer bis zum nächsten eintreffenden Impuls wird die Spannung noch nicht bis auf 0 V abgefallen sein.

Die für die Registrierung eines Impulses benötigte Information steckt also in einem Spannungssprung, d.h. in einer extrem kurzen Spannungsänderung am Ausgang der Integratorstufe. Eine solche Spannungsänderung (innerhalb einer ansonsten langsam exponentiell abfallenden Spannungskurve) lässt sich nicht ohne weiteres registrieren. Daher wird die anschließende Filterstufe benötigt, welche aus jedem einzelnen Spannungssprung einen wohldefinierten Spannungsimpuls formt (Abb. 2.24). Diese Impulse bieten den Vorteil, dass sie ein ausgeprägtes Maximum besitzen (proportional zum Spannungssprung) und dass sie innerhalb einiger Mikrosekunden wieder einen stabilen Nullpegel erreichen. Da es sich um bipolare Impulse handelt, deren Flächen unter dem positiven und dem negative Teil gleich groß sind, können diese Impulse auch kapazitiv übertragen werden, ohne dass es zu einer Verschiebung des Nullpegels bei Ände-

rungen der Impulsrate kommt. Die kapazitive Einkopplung ist besonders dann wichtig, wenn diese Impulse über größere Distanzen übertragen werden sollen. Bei Übertragung eines Gleichspannungsanteils über größere Distanzen kann es zu einer Spannungsverschiebung aufgrund von nicht zu vernachlässigenden Leitungswiderständen in den Versorgungsleitungen kommen.

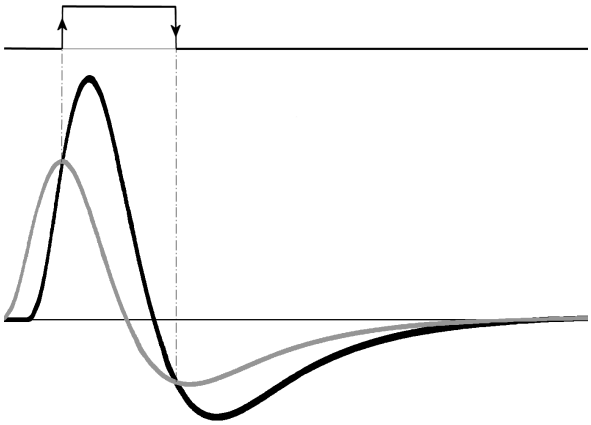

Abb. 2.26
Bestimmung des Maximums der Signale: abgeschwächter Summenimpuls (grau) und verzögerter Summenimpuls (schwarz) werden auf die beiden Eingänge eines Komparators gegeben. Die obere Kurve zeigt das Ausgangssignal des Komparators.

2.4.3 Digitaler Positions-Analysator

Vom Detektor aus werden also vier bipolare Spannungsimpulse zur weiteren Auswertung an die Auswerte-Elektronik übertragen. Während der ORFEUS-Mission bestand diese Auswerte-Elektronik sowohl aus der zur Ortsbestimmung notwendigen Elektronik, als auch aus einem Bordrechner zur Datenerfassung. Sowohl Elektronik als auch Bordrechner wurden von unserem Institut entwickelt und gebaut. In Abb. 1.1 befindet sich diese Elektronik unter dem schwarzen Rechteck auf der linken Seite unter der Ausbuchtung des Echelle-Spektrometers.

Für diesen Versuch verwenden wir die ursprünglich für den optischen Detektor gebaute Auswerte-Elektronik: den Digitalen Positions-Analysator. Diese Elektronik erfüllt folgende Aufgaben:

- Erkennen der Impulse
- Digitalisierung der Maximumwerte der Spannungsimpulse (X_1, X_2, Y_1, Y_2) mit 12 Bit Genauigkeit
- Bestimmung der Summen ΣX_i , ΣY_i
- Berechnung der Ortsposition $\mathbf{X} = X_2/\Sigma X_i$, $\mathbf{Y} = Y_2/\Sigma Y_i$ mit 12 Bit Genauigkeit
- Berechnung der Impulshöhe $\mathbf{Z} = \Sigma X_i + \Sigma Y_i$
- Erfassung der Zeit zu jedem Ereignis
- Übertragung der Daten zum Computer

Zur Steuerung der Impulsverarbeitung wird eine Steuerelektronik verwendet, die als Eingangssignal die Summe der vier Ladungsverstärkerimpulse verwendet. Wichtigste Aufgabe ist die Erkennung der Maxima der Impulse, deren Werte festgehalten und digitalisiert werden sollen. Dazu wird der Summenimpuls einmal abgeschwächt (grau, Abb. 2.26) und einmal verzögert (schwarz) auf die beiden Eingänge eines Komparators

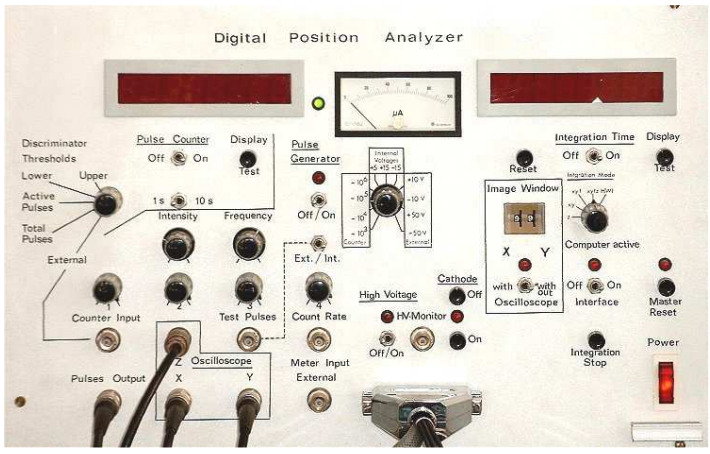

Abb. 2.27
Frontansicht des DPA

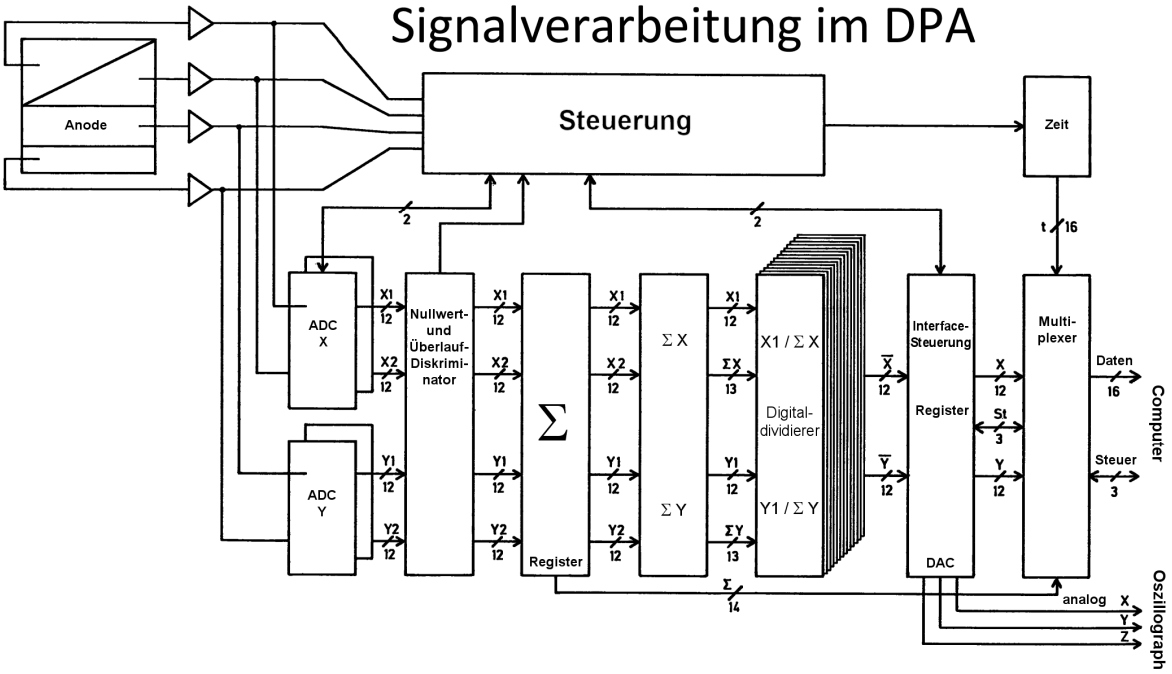

Abb. 2.28
Blockschaltbild des DPA (Quelle: Barnstedt 1985)

gegeben. Mit einem Potentiometer wird die Abschwächung des Impulses so eingestellt, dass der verzögerte Impuls den abgeschwächten Impuls genau in dessen Maximum schneidet und daher der Komparator dort eine steigende Flanke erzeugt. Diese Flanke dient zum Starten der Analog-Digital-Wandler, die den Spannungswert der vier Signale im Maximum festhalten und digitalisieren. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Maximumbestimmung unabhängig von der Impulshöhe funktioniert. Mit zwei weiteren Komparatoren werden eine untere und eine obere Diskriminatorschwelle eingestellt. Dadurch wird die Übernahme zu schwacher oder übersteuerter Impulse verhindert. Abb. 2.27 zeigt die Frontansicht des DPA, ein Blockschaltbild ist in Abb. 2.28 dargestellt. Für den DPA ist eine separate Bedienungsanleitung vorhanden.

2.4.4 Datenerfassung am Computer

Die Datenerfassung erfolgt mit einem PC unter Windows 2000. Dieser PC verfügt über 2 Interfaces: ein Vielzweck-Interface mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen zur Steuerung des Detektors und der Hochspannung und ein schnelles 32-Bit Parallel-Interface zur Erfassung der Detektordaten. Es ist Software vorhanden zur Steuerung der Hochspannung und der Testimpulse sowie zur Datenerfassung. Bei der Datenerfassung stehen verschiedene Modi zur Verfügung:

- Bildintegration (X, Y): Erfassung der Koordinaten mit 10 Bit (Bildgröße 1024 x 1024 Pixel)
- Integration einer Impulshöhenverteilung (Z)
- Bildintegration mit Verstärkungsbild (X, Y, Z)
- Serielle Aufzeichnung aller Ereignisse einschließlich der Zeitinformation für jedes Photon mit bis zu Mikrosekunden-Genauigkeit (X, Y, Z, T)

Für die Programme sind separate Bedienungsanleitungen vorhanden.

2.5 Eigenschaften der Detektorelektronik

Dieses Kapitel behandelt die Eigenschaften der Abbildung des Detektorsystems, die durch die Elektronik bedingt sind. Dazu gehören das Rauschen der Ladungsverstärker, ungleichmäßige Verstärkungsfaktoren der vier Ladungsverstärker und das kapazitive Übersprechen zwischen den vier Anoden-Elektroden.

2.5.1 Rauschen

Da der Auftreffort eines Photons pro Achse aus je zwei Ladungsverstärkersignalen berechnet wird, geht das Rauschen auf diesen Signalen direkt in die Ortsauflösung des Detektors ein. Das Rauschen lässt sich als Gaußsche Normalverteilung der Spannungsmesswerte um einen mittleren Wert mit der Standardabweichung (mittlerer quadratischer Fehler) σ_U beschreiben. Wird nun eine Größe x aus den Spannungswerten U_1 und U_2 zu $x = U_1/(U_1+U_2)$ berechnet, wobei den Spannungen U_1 und U_2 jeweils eine Rauschspannung mit der Standardabweichung σ_U überlagert ist, so lässt sich zeigen (Knapp 1978), dass sich x ebenfalls mit einer Normalverteilung um einen Mittelwert verteilt. Dabei gilt für die Standardabweichung von x:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_U}{z}\sqrt{2x^2 - 2x + 1} \qquad (2.3)$$

mit $z = U_1+U_2$. Der Ausdruck $\sqrt{2x^2 - 2x + 1}$ nimmt für $x = 0$ und $x = 1$ (d.h. am Anodenrand) den Wert 1 an, während der Minimalwert für $x = 0{,}5$ (d.h. in der Anodenmitte) bei $1/\sqrt{2} = 0{,}71$ liegt. Die Verteilung in X-Richtung entspricht einem Schnitt durch ein Punktbild. Für die Beschreibung der Auflösung ist statt der Standardabweichung die volle Halbwertsbreite besser geeignet. Für eine Normalverteilung ist der Zusammenhang zwischen *FWHM* (*full width at half maximum*) und Standardabweichung σ:

$$FWHM = \sigma \cdot 2\sqrt{2 \cdot \ln 2} = 2{,}35 \cdot \sigma \qquad (2.4)$$

Die volle Halbwertsbreite ist auch als Auflösungsgrenze anzusehen, d.h. sie ist der kleinste Abstand, bei dem zwei Punktbilder gerade noch getrennt werden können. Das Auflösungsvermögen in Linienpaaren pro Längeneinheit ergibt sich damit als $1/FWHM$.

2.5.2 *Partition Noise*

Die auf die Anode auftreffende Elektronenwolke besteht aus einer endlichen Anzahl von Elektronen. Diese Elektronen teilen sich auf die vier Elektroden der Anode auf. Die bei der Aufteilung entstehenden statistischen Schwankungen werden *Partition Noise* genannt. Welchen Einfluss haben diese Schwankungen auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung?

Der Einfachheit halber können wir davon ausgehen, dass die Positionsbestimmung in beiden Achsen unabhängig voneinander ist. Die beiden Keilelektroden zusammen bzw. die beiden Rechteckelektroden zusammen erhalten jeweils die Hälfte der auftreffenden Gesamtladung. Betrachten wir also die x-Richtung mit den beiden Keilelektroden. An der Stelle x (normiert, $0 \le x \le 1$) treffe die Ladungswolke mit der Gesamtladung Q auf. Auf die beiden Keile entfällt zusammen die Ladung $Q/2$ bzw. die Elektronenzahl

$N/2$ mit $N = Q/q$ und q = Elektronenladung. Im Mittel wird auf die Keilelektrode 1 die Elektronenzahl $N_1 = x \cdot N/2$ und auf die Keilelektrode 2 die Elektronenzahl $N_2 = (1\text{-}x) \cdot N/2$ entfallen.

Statistisch gesehen wird jedes der $N/2$ Elektronen mit der Wahrscheinlichkeit $p_1 = x$ auf die Elektrode 1 auftreffen und mit der Wahrscheinlichkeit $p_2 = 1\text{-}x$ auf die Elektrode 2. Eine solche Situation, in der ein Ereignis zwei verschiedene Zustände annehmen kann, wird statistisch durch eine Binomialverteilung beschrieben (Weinzierl / Drosg 1970):

$$P_{n,p}(k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k} \qquad (2.5)$$

Die Verteilungsfunktion $P_{n,p}(k)$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass bei n Versuchen genau k positive Ereignisse gemessen werden, wenn die Wahrscheinlichkeit für ein positives Ereignis p ist. In unserem Fall ist die Anzahl der Versuche $n = N/2$, d.h. die Anzahl der Elektronen, die auf die Keilelektroden auftreffen. Ein positives Ereignis ist das Auftreffen eines Elektrons auf die Elektrode 1, entsprechend ist hier $p = p_1 = x$, und k ist die Anzahl der auf die Elektrode 1 aufgetroffenen Elektronen.

Für die Streuung oder Standardabweichung σ der Werte k um den Mittelwert N_1 gilt für eine Binomialverteilung:

$$\sigma = \sqrt{p \cdot (1-p) \cdot n} = \sqrt{x \cdot (1-x) \cdot \frac{N}{2}} \qquad (2.6)$$

Die linke Wurzel gilt für den allgemeinen Fall und die rechte Wurzel gilt für unseren Fall mit den obigen Definitionen.

σ verschwindet an den Rändern der Anode ($x = 0$ und $x = 1$), während es in der Bildmitte ($x = 0{,}5$) maximal ist: $\sigma_{max} = 0{,}5 \cdot \sqrt{N/2}$. Dieser Wert bezieht sich auf die tatsächlichen Elektronenzahlen. Um ihn auf die Streuung der relativen Ortsposition x ($0 \le x \le 1$) umzurechnen, ist der Wert durch die Elektronenzahl $N/2$ zu dividieren. Außerdem können wir näherungsweise Gl. (2.4) verwenden, um die Streuung in die volle Halbwertsbreite umzurechnen, so dass sich in der Bildmitte für die volle Halbwertsbreite eines durch *Partition Noise* verbreiterten Punktbildes ergibt:

$$FWHM_{part} = 2{,}35 \cdot \frac{1}{\sqrt{2N}} = 1{,}66 \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \qquad (2.7)$$

Nimmt man den Kehrwert diesen Wertes als Maß für die Zahl der Bildpunkte, die man pro Achse sinnvollerweise erreichen kann, so erhält man für $N = 10^6$: 600, für $N = 10^7$: 1900 und für $N = 10^8$: 6000. Ab etwa 10^7 Elektronen spielt also *Partition Noise* für die Auflösung des Detektors mit 1024 Bildpunkten pro Achse keine wesentliche Rolle mehr.

2.5.3 Übersprechen

Die Elektroden der Keil-Streifen-Anode wirken untereinander als Kapazitäten. Die Ladungsverstärker-Eingänge besitzen eine dynamische Eingangskapazität. Entsprechend dem Verhältnis der Eingangskapazität zur Elektroden-Kapazität wird ein Teil der auf eine Elektrode auftreffenden Ladung auch kapazitiv auf die anderen Elektroden eingekoppelt (Übersprechen). Welche Auswirkungen hat das auf die berechnete Ortsposition x'?

Betrachten wir zunächst die ideale Koordinate in einer Achse, z.B. der X-Achse, die aus den beiden Keil-Ladungen Q_1 und Q_2 berechnet wird (die Gesamtladung ist $Q = Q_1+Q_2$):

$$x = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_2}{Q} \tag{2.8}$$

x kann dabei Werte von 0 (= linker Anodenrand) bis 1 (= rechter Anodenrand) annehmen. Die gemessenen Spannungen U_1 und U_2 berechnen sich mit dem Verstärkungsfaktor v und einem Übersprechanteil b zu $U_1 = v\cdot(Q_1 + bQ_2)$ und $U_2 = v\cdot(Q_2 + bQ_1)$. Damit ergibt sich für x':

$$x' = \frac{U_2}{U_1 + U_2} = \frac{Q_2 + bQ_1}{Q_1 + bQ_2 + Q_2 + bQ_1} \tag{2.9}$$

Löst man Gleichung (2.8) nach Q_2 auf und setzt dies wieder in (2.9) ein, so kürzt sich Q heraus und man erhält als Zusammenhang zwischen dem gemessenen Wert x' und der tatsächlichen Position x:

$$x' = \frac{x(1-b)+b}{1+b} = x\frac{1-b}{1+b} + \frac{b}{1+b} \tag{2.10}$$

Plausibilitätsbetrachtung:
$x = 0$: $x' = b/(1+b)$
$x = ½$: $x' = ½$
$x = 1$: $x' = 1-b/(1+b)$

Das Übersprechen bewirkt also eine Schrumpfung des Bildes, die beiden Ränder werden um den Betrag $b/(1+b)$ nach innen verschoben.

2.5.4 Verstärkungsunterschiede

Für eine exakt lineare Abbildung ist es notwendig, dass die beiden Ladungsverstärker, aus deren Signale die Position in der jeweiligen Achse berechnet wird, auch den exakt gleichen Verstärkungsfaktor aufweisen (und natürlich auch das gleiche zeitliche Verhalten). Das bedeutet, dass alle elektronischen Bauteile der Schaltung aus Abb. 2.22 exakt die gleichen Werte aufweisen müssen. Da elektronische Bauteile immer eine gewisse Toleranz gegenüber ihren Sollwerten aufweisen, ist es notwendig, viele Bauteile auszumessen und die passendsten an den jeweils gleichen Stellen der beiden Ladungsverstärker zu verwenden. Bei im Labor verwendeter Elektronik ist es möglich, Widerstände über Potentiometer abzugleichen. In gewissem Umfang ist das auch bei Kapazitäten mit Trimm-Kondensatoren möglich. Bei Elektronik,

die in Satelliten eingesetzt wird, gibt es diese Möglichkeiten nicht. Da Potentiometer nicht schüttelfest sind, dürfen sie in der Raumfahrt nicht eingesetzt werden. Man muss in der Schaltung entsprechenden Platz für zusätzliche Abgleichwiderstände vorsehen. Aber auch damit erreicht man in der Regel nur Prozent-Genauigkeiten. Man muss also damit leben, dass die Verstärkungsfaktoren nur bis auf ein paar Prozent genau übereinstimmen. Dies führt zu Nichtlinearitäten bei der Abbildung im Prozentbereich, die später bei der Datenauswertung wieder herausgerechnet werden müssen.

Wie sieht nun die Formel für diese Nichtlinearität aus? Die tatsächliche Ortsposition x ist in Gleichung (2.8) definiert. Ideale Ladungsverstärker erzeugen daraus Spannungsimpulse U_1 und U_2, die exakt proportional zu Q_1 und Q_2 sind. In der Praxis aber werden die beiden Verstärkungsfaktoren etwas unterschiedlich sein. Wir nehmen also an, dass $U_1 = v \cdot Q_1$ und $U_2 = v \cdot (1+a) \cdot Q_2$ ist; a ist also ein kleiner Korrekturwert für den Verstärkungsfaktor, der auch negativ sein kann. Die Auswerte-Elektronik berechnet also tatsächlich den Wert x'':

$$x'' = \frac{U_2}{U_1 + U_2} = \frac{Q_2(1+a)}{Q_1 + Q_2(1+a)} \tag{2.11}$$

Löst man Gleichung (2.8) nach Q_2 auf und setzt dies in (2.11) ein, so kürzt sich Q heraus und man erhält als Zusammenhang zwischen dem gemessenen Wert x'' und der tatsächlichen Position x:

$$x'' = x\frac{1+a}{1+xa} \tag{2.12}$$

Plausibilitätsprüfung: Für $a = 0$ erhält man die Identität $x'' = x$. Sonst aber bleiben nur die Werte für die Ränder unverändert: Für $x = 0$ ergibt sich $x'' = 0$ und für $x = 1$ wird $x'' = 1$. Das Bild wird also so verzerrt, dass die Bildränder erhalten bleiben, die Bildmitte aber ein Stückchen verschoben wird.

Wie das Übersprechen ist auch dieser Effekt bei der Datenauswertung zu korrigieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Übersprechen zuerst passiert und die unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren anschließend in die Ortsberechnung eingehen.

Bildet man die Ableitung von x'' nach x, so erhält man ein Maß für die Pixelzahl pro Längeneinheit an der Anodenposition x (falls x'' in Pixeleinheiten angegeben wird und x in wahrer Anodengröße):

$$\frac{dx''}{dx} = \frac{1+a}{(1+xa)^2} \tag{2.13}$$

Der Kehrwert wäre ein Maß für die Pixelgröße bezogen auf die Anodenposition. Ein Wert von 1 entspricht dabei dem Sollwert, den man z.B. auch für $a = 0$ erhält. Es existiert immer eine x-Position mit einem Ableitungswert von 1, da an den beiden Rändern jeweils ein Wert größer und einer kleiner als 1 ist. Setzt man $\frac{dx''}{dx} = 1$ und löst nach x auf, so erhält man:

$$x = \frac{\sqrt{1+a}-1}{a} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{8}a \qquad (2.14)$$

Den letzten Ausdruck erhält man nach Reihenentwicklung der Wurzel bis zum quadratischen Term. Wie zu erwarten erhält man also eine nominelle Pixelgröße in etwa in der Bildmitte.

Aufgabe 6:

Leiten Sie die Gleichung (2.13) aus Gleichung (2.12) her.

2.5.5 Offset

Wie in Kap. 2.4.2 (S. 20) beschrieben, lassen sich die Ladungsverstärkerimpulse kapazitiv übertragen, ohne dass sich der Nullpegel der Signalleitung verschiebt. Allerdings können in der weiteren Signalverarbeitung, insbesondere bei den Analog-Digital-Wandlern, solche Nullpegel-Verschiebungen auftreten. Man spricht dabei von Offset-Spannungen. Jede AD-Wandlerplatine enthält daher ein Potentiometer, mit dem sich diese Offsetspannung auf Null einstellen lassen sollte.

Wie macht sich ein solcher Offsetfehler im Bild bemerkbar? Nehmen wir an, dass auf dem zweiten Signal eine konstante Offsetspannung auftritt, die einer Offset-Ladung Q_{off} entsprechen würde. Es ergibt sich also mit $U_1 = v \cdot Q_1$ und $U_2 = v \cdot (Q_2 + Q_{off})$ für die berechnete Position x''':

$$x''' = \frac{U_2}{U_1 + U_2} = \frac{Q_2 + Q_{off}}{Q_1 + Q_2 + Q_{off}} \qquad (2.15)$$

Mit den gleichen Definitionen für x und Q wie in den vorigen Kapiteln lässt sich dies umformen zu

$$x''' = x \frac{1}{1 + \frac{Q_{off}}{Q}} + \frac{Q_{off}}{Q + Q_{off}} \qquad (2.16)$$

Da gelten soll, dass $Q_{off} \ll Q$, lässt sich der erste Bruch bis zum ersten Glied in eine Reihe entwickeln und im zweiten Bruch Q_{off} gegen Q vernachlässigen:

$$x''' \approx x\left(1 - \frac{Q_{off}}{Q}\right) + \frac{Q_{off}}{Q} \qquad (2.17)$$

Betrachtung der Randfälle: $x = 0$: $x''' = Q_{off} / Q$

$x = 1$: $x''' = 1$

Während sich am rechten Rand ($x = 1$) keine Änderung ergibt, erhält man am linken Rand ($x = 0$) eine Verschiebung des Bildpunkts um Q_{off} / Q, also eine Änderung, die auch von der Gesamtladung abhängt. Die Verschiebung ist daher für kleine Impulse am stärksten. Diese Verschiebung tritt auf der Bildseite

auf, an dem das vom Offsetfehler betroffene Signal (hier Q_2) klein ist, weil dann der relative Fehler Q_{off} / Q_2 besonders groß ist.

2.5.6 Totzeit

Der elektronische Effekt der Totzeit wirkt sich auf die Effizienz des Detektors aus. Unter Totzeit versteht man die Zeitspannen, während der die Elektronik nicht in der Lage ist, Impulse zu verarbeiten. Der Grund kann sein, dass sie gerade damit beschäftigt ist, ein Ereignis zu verarbeiten (z.B. während der Analog-Digital-Wandlung), oder dass eine Messung zu diesem Zeitpunkt verfälscht würde (z.B. während des Unterschwingers eines Impulses, siehe Abb. 2.24).

Der DPA führt eine Analog-Digital-Wandlung in 2 µs durch, also wesentlich schneller als die Ladungsverstärker-Impulse abklingen. Auch die eigentliche Ortsberechnung wird mit einer Dauer von etwa 0,5 µs sehr schnell ausgeführt. Damit sind die Ladungsverstärker-Impulse das langsamste Glied in der Signalverarbeitungskette. Sie benötigen 10 - 13 µs bis der Nullpegel vollständig wieder hergestellt ist. Erst danach ist eine sinnvolle Impulsverarbeitung wieder möglich, da vorher das Signal durch einen Offsetfehler verfälscht würde.

Um die Signalverarbeitung während der Unterschwinger der Ladungsverstärker-Impulse zu unterbinden, enthält die Steuerlogik ein Monoflop, welches beim Nulldurchgang der Impulse bei rund 2 µs getriggert wird. Es sperrt für etwa 11 µs die Impulserkennung. Impulse, die in dieser Zeit ankommen, werden also ignoriert. Außerdem wird das Monoflop durch neue Impulse nachgetriggert, d.h. der aktive Zustand des Monoflops wird ab diesem Zeitpunkt um noch mal 11 µs verlängert. Insgesamt beträgt die Totzeit eines Impulses etwa 13 µs.

Impulse, die innerhalb der ersten Mikrosekunde (bis zum Maximum des ersten Impulses) hintereinander eintreffen, können von der Elektronik nicht auseinander gehalten werden. Solche nahezu gleichzeitig eintreffenden Impulse (*pile-up*) werden also zusammen wie ein Impuls verarbeitet. Da die meisten dieser Doppelimpulse aber so groß sind, dass sie die obere Diskriminatorschwelle überschreiten, werden sie zu einem Großteil unterdrückt.

Wie wirkt sich die Totzeit auf die elektronische Effizienz des Systems aus? Die gemessenen Ereignisse unseres Detektors verhalten sich statistisch unabhängig voneinander, sie lassen sich mit der Poissonverteilung beschreiben (Weinzierl / Drosg 1970):

$$P_x = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \tag{2.18}$$

Diese gibt die Wahrscheinlichkeit an, gerade x positive Ereignisse zu beobachten, wenn der „wahre“ Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung m ist. Positive Ereignisse sind bei uns die während der Beobachtungszeit t auftretenden Impulse. Bei einer mittleren Zählrate n_0 ist $m = n_0 \cdot t$. Die Wahrscheinlichkeit P_0, dass in der Messzeit t kein Ereignis auftritt, ist also (mit 0! = 1):

$$P_0 = e^{-n_0 t} \tag{2.19}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Impuls in dem auf t folgenden kleinen Zeitintervall zwischen t und $t + dt$ auftritt, ist genau $n_0 \cdot dt$ (nach Definition von n_0 und mit $dt \ll 1/n_0$). Da die Wahrscheinlichkeiten voneinander unabhängig sind, können sie miteinander multipliziert werden. Man erhält damit für die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein Ereignis nach der Zeit t im Zeitintervall dt eintrifft:

$$dP_t = n_0 \cdot e^{-n_0 t} dt = e^{-n_0 t} d(n_0 t) \tag{2.20}$$

Kurze Intervalle zwischen den Zählimpulsen treten also exponentiell häufiger auf. Es ist daher prinzipiell nicht möglich, mit einer totzeitbehafteten Elektronik verlustfreie Messungen durchzuführen. Die Elektronik mit der Totzeit τ registriert also Ereignisse nur dann, wenn ihr Intervallabstand zum vorherigen Impuls größer als τ ist. Durch Integration von Gleichung (2.20) ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit von Impulsabständen $t > \tau$:

$$P_{t>\tau} = \int_{t=\tau}^{\infty} dP_t = n_0 \int_{\tau}^{\infty} e^{-n_0 t} dt = e^{-n_0 \tau} \tag{2.21}$$

Da die pro Zeiteinheit im Mittel eintreffenden n_0 Impulse statistisch unabhängig voneinander sind, ist die pro Zeiteinheit von der Elektronik registrierte Anzahl von Ereignissen n gegeben durch

$$n = n_0 \cdot e^{-n_0 \tau} \tag{2.22}$$

Für sehr große Impulsraten ($n_0 \to \infty$) geht n gegen Null, d.h. praktisch alle Impulsintervalle sind kleiner als die Totzeit τ. Es gibt daher ein Maximum der Kurve aus Gleichung (2.22). Durch Differenzieren von (2.22) nach n_0 und Nullstellenbestimmung ergibt sich das Maximum bei $n_0 = 1/\tau$ und damit für die maximal registrierbaren Ereignisse

$$n_{\max} = \frac{1}{\tau \cdot e} \tag{2.23}$$

Mit $\tau = 13$ µs ergibt sich eine maximal registrierbare Ereignisrate von $n_{\max} = 28.300\ s^{-1}$ bei einer Rate an einfallenden Impulsen von $n_0 = 76.900\ s^{-1}$, die Effizienz ist dabei 1/e = 37 % (Abb. 2.29).

Um aus einer gemessenen Zählrate n bei bekannter Totzeit τ die tatsächliche Zählrate n_0 zu bestimmen verwendet man üblicherweise folgende Näherungsformel, da sich Gleichung (2.22) nicht analytisch nach n_0 auflösen lässt:

$$n_0 \approx \frac{n}{1 - n \cdot \tau} \tag{2.24}$$

Diese Korrektur ist natürlich nur bei Zählraten anwendbar, deren Wert deutlich kleiner als $1/\tau$ ist. Ist $n_0 < 14\%$ von $1/\tau$ ($n < 12\%$), so ist der Fehler dieser Formel kleiner als 1%, bei $n_0 = 44\%$ von $1/\tau$ ($n = 28\%$) beträgt der Fehler bereits 10%.

Eine genauere Näherungsformel lässt sich herleiten, wenn man in Gleichung (2.22) die Exponentialfunktion in eine Reihe entwickelt. Berücksichtigt man in dieser Reihenentwicklung die Summanden bis zum quadratischen Term und löst die Gleichung nach n_0 auf, so erhält man nach längerer Rechnung:

$$x_0 \approx \frac{1}{3}\left(2+\sqrt[3]{x'+\sqrt{x'^2+8}}+\sqrt[3]{x'-\sqrt{x'^2+8}}\right) \qquad (2.25)$$

Hierbei ist $x' = (27x\text{-}10)$ und x und x_0 sind normierte Zählraten: $x = n\,\tau$ und $x_0 = n_0\,\tau$. Diese Korrektur liefert für $n_0 < 0{,}33/\tau$ ($n < 0{,}24/\tau$) einen Fehler von <1% und für $n_0 < 0{,}62/\tau$ ($n < 0{,}33/\tau$) einen Fehler von <10%. Bei beiden Formeln ist der berechnete Wert für n_0 übrigens kleiner als der tatsächliche Wert.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch erwähnt, dass es auch Elektroniken mit einem anderen Totzeitverhalten gibt, bei denen die in der Totzeit eintreffenden Impulse die Totzeit nicht nachtriggern. Solche Elektroniken können unmittelbar nach Ablauf der Totzeit einen neuen Impuls verarbeiten, unabhängig davon, wie viele Impulse während der Totzeit eintrafen. Ein Beispiel dafür wäre ein Detektorsystem, bei dem die Dauer der Analogimpulse gegenüber der Dauer der Analog-Digital-Wandlung zu vernachlässigen ist. Impulse, die während der Dauer der Analog-Digital-Wandlung einträfen, würden diese nicht stören (in der Regel wird die Analogspannung in Abtast-Halte-Gliedern zwischengespeichert). Die in dem Zeitraum der AD-Wandlung eintreffenden Impulse würden ignoriert, aber nach Beendigung der AD-Wandlung könnten neue Impulse wieder verarbeitet werden. Bei diesem Totzeitverhalten geht die maximal erreichbare Ausgangsrate gegen einen konstanten Wert $n_{max} = 1/\tau$.

Bei dem ORFEUS-Detektor aber sind die Analog-Impulse das langsamste Glied der Signalverarbeitungskette. Daher muss eine Optimierung der Elektronik für zukünftige Projekte darauf abzielen, die Ladungsverstärker mit einer schnelleren Elektronik zu versehen.

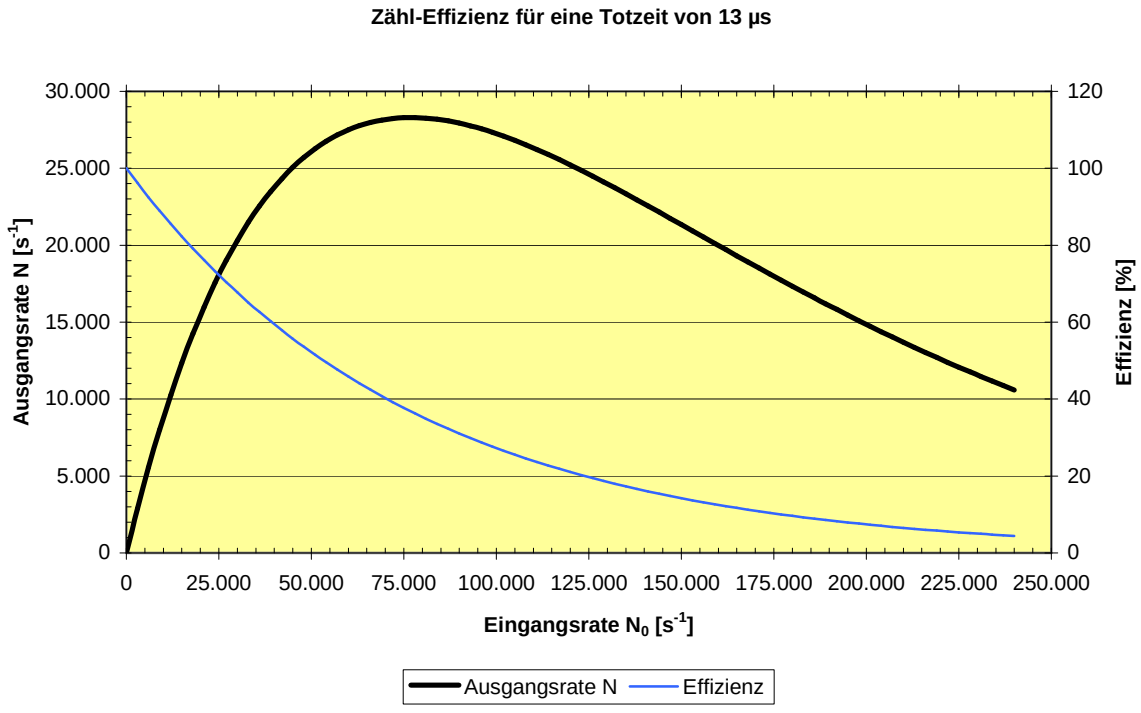

Abb. 2.29
Ausgangsrate und Effizienz für eine Totzeit von τ = 13 µs in Abhängigkeit von Eingangsrate

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus vier Komponenten:

- Detektor mit Hochspannungsversorgung und Vakuumpumpe
- Optische Bank
- Rack mit DPA, Speicherbildschirm, Druckmessgerät und Oszillograph
- Computer

3.1 Detektor mit Hochspannungsversorgung und Vakuumpumpe

Abb. 3.1 zeigt den Detektor mit der Hochspannungsversorgung. Links befindet sich der Vakuumanschluss der zur Vakuumpumpe führt. Diese ist unter dem Tisch untergebracht. Das am Detektor befindliche Vakuumventil muss stets ganz geöffnet sein, d.h. die Betätigungsschraube muss vollständig herausgedreht sein. **Dies ist vor dem Einschalten der Hochspannung unbedingt zu überprüfen!**

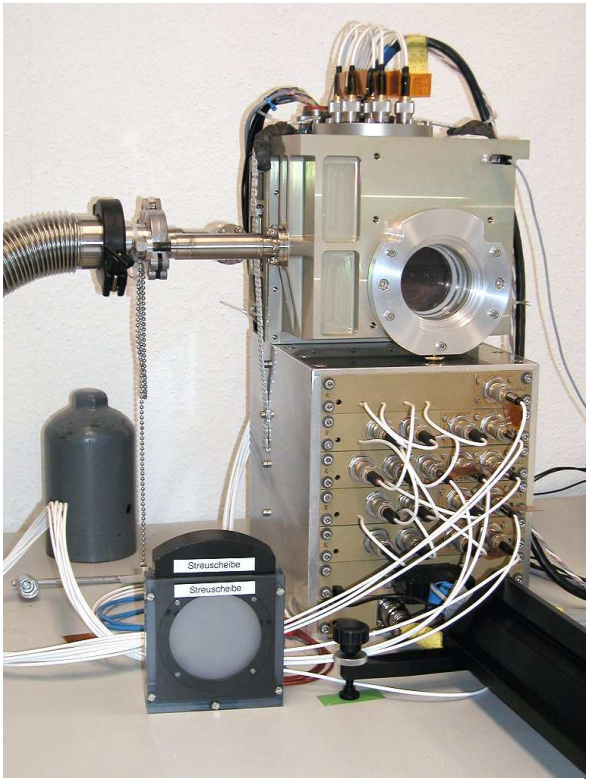

Abb. 3.1
Detektor mit Hochspannungsversorgung und Streuscheibe

Da das Abpumpen des Detektors relativ lange dauert, sollte die Vakuumpumpe ständig in Betrieb sein und der Detektor sich daher immer unter Vakuum befinden.

Muss die Vakuumpumpe einmal abgestellt werden, ist der Pumpstand komplett mit Argon zu füllen. Erst bei Erreichen eines leichten Überdrucks ist das Detektor-Ventil zu schließen. Dadurch wird verhindert, dass der Detektor sich durch die immer vorhandenen kleinen Mikrolecks allmählich mit Luft füllt. Die Luftfeuchtigkeit würde die KBr-Photokathode mit der Zeit zerstören. Unter einer reinen Argon-Atmosphäre kann der Detektor sehr lange gelagert werden, ohne dass sich an den Eigenschaften etwas ändert.

Das Druckmessgerät im Rack misst den Druck direkt an der Pumpe. Der Druck wird in Millibar (= hPa) angezeigt. Der Druck im Detektorgehäuse ist um rund einen Faktor 100 schlechter, da der Pumpquerschnitt durch den Schlauch und das Ventil sehr klein ist. Bei unbeleuchtetem Detektor beträgt der angezeigte Druck etwa $5 \cdot 10^{-7}$ mbar. Die Hochspannung darf nur eingeschaltet werden, solange der Druck kleiner als $1 \cdot 10^{-6}$ mbar ist.

Bei Inbetriebnahme des Detektors steigt der Druck zunächst etwas an. Das liegt daran, dass sich alle in einem Vakuum befindlichen Oberflächen mit Restgasen belegen, entsprechend dem aktuellen Druck in dem Vakuumbehälter, insbesondere also auch die Wände der MCP-Kanäle. Unter Elektronenbeschuss

lösen sich die Restgase von den Wänden, die dadurch gereinigt werden. Durch dieses Ausgasen steigt der Druck im Detektorgehäuse zunächst an, bis die Wände wieder sauber sind.

Aufgabe 7:

Berechnen Sie die Gesamtoberfläche aller Kanalwände einer ORFEUS-MCP mit einer Dicke von 1 mm (siehe Kap. 2.2.7, S. 13).

3.2 Optische Bank

Die optische Bank (Abb. 3.2) besteht aus folgenden optischen Komponenten:

- Quecksilber-Lampe: Die Lampe strahlt eine Linie bei 254 nm ab, für die der Detektor noch hinreichend empfindlich ist. Vor der Lampe ist eine UV-Streuscheibe angebracht, die für eine gleichmäßige Winkelverteilung des abgestrahlten Lichts sorgt.
- Kleine Irisblende
- Kondensor aus Quarzglas: In gewissem Umfang lässt sich die auf den Detektor treffende Lichtintensität durch den Abstand des Kondensors zur Lampe regeln.
- Auflösungstestmaske
- Linse aus Quarzglas mit großer Irisblende: Die Linse hat eine Brennweite von 20 cm (für sichtbares Licht).
- Maskenhalterung mit weiteren Testmasken

Es werden nicht immer alle Komponenten auf der optischen Bank benötigt.

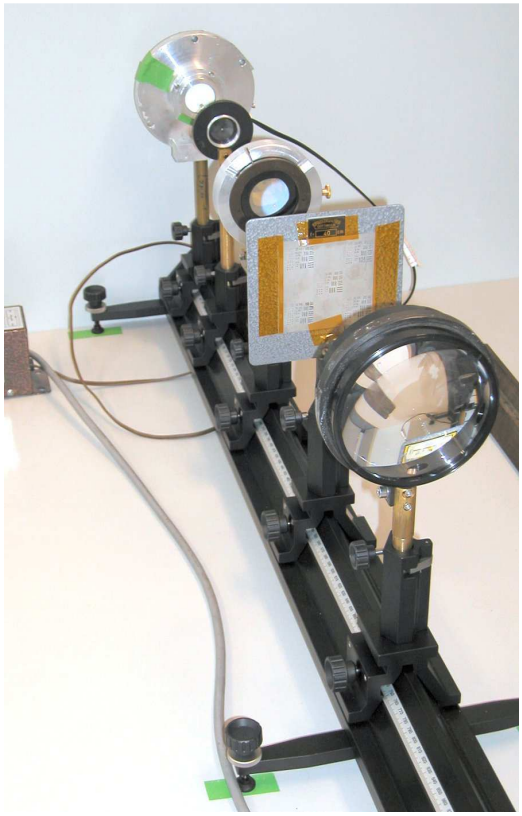

Abb. 3.2
Die optische Bank mit allen Komponenten (von hinten nach vorn): Lampe, kleine Irisblende, Linse mit großer Irisblende, Testmaske, Kondensor.

Aufgabe 8:

Welches ist der kleinste Abstand zwischen Testmaske und Detektor, bei dem eine Abbildung mit der angegebenen Linse möglich ist und welcher Abbildungsmaßstab ergibt sich dabei? Warum werden Linsen aus Quarzglas verwendet?

Hinweis:

UV-Licht kann die Augen reizen, daher sollte längerer Blickkontakt mit der UV-Lampe vermieden werden, auch wenn die Lichtintensität sehr gering ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Lampe einmal ohne Streuscheibe verwendet werden sollte (Brillenträger können diesen Hinweis ignorieren). Um einen Sonnenbrand zu vermeiden, sollte man außerdem darauf verzichten, ungeschützte Köperteile (Hände) für lange Zeit unmittelbar vor die Lampe zu halten. Die Lampe ist bei Nichtgebrauch wieder auszuschalten.

3.3 Digitaler Positions-Analysator

Der Digitale Positions-Analysator (DPA) enthält alle wichtigen Bedienungselemente für die Detektorelektronik (siehe auch Kap. 2.4.3, S. 23). Dies sind (Abb. 3.3):

- Impulszähler mit Zähldauer-Umschalter (1 s / 10 s) und Wählschalter für Impulsart.
- Umschalter für die Auswahl der zu zählenden Impulse:
  - **Total Pulses**: gezählt werden alle Impulse. Die Triggerschwelle ist auf einen positiven Wert eingestellt, der etwas über dem Rauschen liegt.
  - **Active Pulses**: gezählt werden nur die Impulse, die von der Elektronik bearbeitet werden. Während einer Integration sind das nur die Impulse, die auch zum Computer übertragen werden.
  - **Lower Discriminator Threshold**: Es werden alle Impulse gezählt, die die untere Diskriminatorschwelle ansprechen.
  - **Upper Discriminator Threshold**: Es werden alle Impulse gezählt, die die obere Diskriminatorschwelle ansprechen.

Abb. 3.3
Die wichtigsten Bedienelemente des DPA (vergl. auch Abb. 2.27).

- Ausgang der Analogimpulse für Oszillografenanschluss.
- 3 Anschlüsse für den Speicherbildschirm zur Echtzeitdarstellung der registrierten Ereignisse.
- Schalter für die Spannungsversorgung der Hochspannungseinheit.
- Stecker für Verbindungskabel zum Detektor.
- Tastschalter zum Beenden einer Integration.
- Netzschalter.
- Wählschalter zur Auswahl des Integrations-Modes:
  - Stellung 1 (**Z**): Nur die Impulssumme Z wird übertragen zur Integration einer Impulshöhenverteilung.
  - Stellung 2 (**X, Y**): Die Ortskoordinaten werden übertragen zur Integration eines Bildes.
  - Stellung 3 (**X, Y, T**): Die Ortskoordinaten und die Zeitinformation werden übertragen zur seriellen Aufzeichnung der Daten. Bei einer späteren Datenauswertung lassen sich dann Zeitabläufe rekonstruieren.
  - Stellung 4 (**X, Y, T, Z**): Übertragung aller Daten. Damit können alle Integrationsarten durchgeführt werden, insbesondere ist nur in dieser Stellung auch die Integration eines Verstärkungsbildes des Detektors möglich.
  - Stellung 5 (**HWI**) ist zurzeit ohne Funktion.
- Anzeige der Integrationszeit: Die Anzeige erfolgt in Millisekunden, eine Markierung zeigt den Sekunden-Dezimalpunkt. Die Anzeige erfolgt totzeitbereinigt, d.h. die interne Uhr läuft nur dann, wenn die Elektronik bereit ist, neue Ereignisse zu verarbeiten.

- Teilbild-Wählschalter: Ermöglicht die Anwahl eines Teilbildes aus einer 4x4 Matrix. Damit lassen sich Teilbilder in vollen 12 Bit Auflösung, aber ebenfalls in einer Größe von 1024 x 1024 Pixeln integrieren. Zur Anwahl müssen die Werte für X und Y auf einen der Werte von 0 ... 3 gestellt werden.

Für den DPA steht eine separate ausführliche Bedienungsanleitung zur Verfügung.

3.4 Speicherbildschirm

Der Speicherbildschirm (Abb. 3.4) dient der Echtzeitanzeige des Detektorbildes. Jedes registrierte Ereignis wird per X/Y-Ansteuerung als Leuchtpunkt auf dem Bildschirm angezeigt. Dabei sind zwei Betriebsarten möglich: Normal (*STORE* nicht gedrückt) und Speichern (*STORE* gedrückt):

- Normal: Jedes Ereignis leuchtet nur kurz auf, es wird nicht gespeichert. Diese Anzeige ist für hohe Zählraten mit schnell veränderlichen Bildern geeignet. Hierzu ist in der Regel die Strahlintensität etwas zu erhöhen (Drehknopf *INTENSITY* unter der Klappe).
- Speichern: Der Bildschirm wird in einen Speichermodus geschaltet. Dabei leuchtet jeder Bildpunkt für eine gewisse Zeit nach. Die Nachleuchtdauer wird mit dem Drehknopf *PERSISTENCE* eingestellt. Durch Herausziehen dieses Knopfes bleibt das aktuelle Bild gespeichert. Mit dem Drehknopf *OPERATE LEVEL* wird die Helligkeit des Speicherbildes eingestellt. Die Taste *ERASE* dient dem Löschen des Speicherbildes.

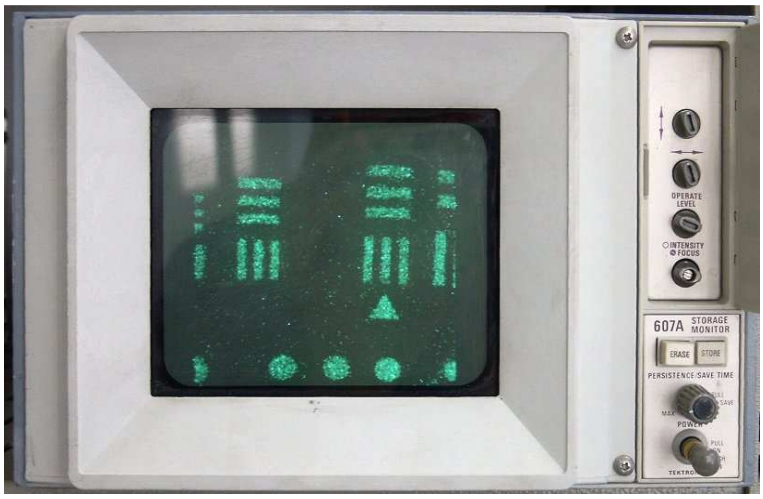

Abb. 3.4
Der Speicherbildschirm mit Echtzeitbild des Detektors.

Da der Speicherbildschirm nur eine begrenzte Lebensdauer hat, sollte er nicht länger als notwendig im Speichermodus betrieben werden. Bei stehendem Strahl sollte die Strahlintensität heruntergedreht werden um ein Einbrennen zu vermeiden.

3.5 Oszillograph

Mit dem Oszillografen (Abb. 3.5) werden die Detektor-Summenimpulse dargestellt. Die besten Einstellungen sind:

- Y-Ablenkung: 1 V/DIV
- Zeitablenkung: 0.5 µs/DIV
- Trigger: kleine positive Spannung, ansteigende Flanke

Bei der Darstellung von Testimpulsen sind auch negative Impulse zu sehen (da Testimpulse durch Rechteckimpulse erzeugt werden, die eine positive und eine negative Flanke besitzen). Die negativen Testimpulse werden erst beim (positiven) Nulldurchgang des Unterschwingers getriggert, so dass sich zwei Impulsformen überlagern.

Abb. 3.5
Der Oszillograph mit den Detektor-Summenimpulsen.

3.6 Computer und Software

Zwei Programme werden für den Betrieb des Detektors und die Datenerfassung benötigt: Das Programm *HV-Kontrolle* steuert die Hochspannung des Detektors und bietet außerdem Testmöglichkeiten durch Testimpulse und durch eine Verstärkungsanzeige. Das Programm *Erfassung* ermöglicht die Integration der vom Detektor erfassten Ereignisse. Die beiden Programme werden hier kurz vorgestellt, eine ausführliche Bedienungsanleitung ist separat vorhanden.

3.6.1 Programm *HV-Kontrolle*

Das Programm *HV-Kontrolle* dient in erster Linie der Steuerung und Überwachung der Detektor-Hochspannungsversorgung. Es überwacht auch den Druck des Vakuumsystems und schaltet die Hochspannung bei Überschreiten einer Druckschwelle aus, bzw. verhindert das Einschalten der Hochspannung bei zu hohem Druck. Die wichtigsten Funktionen und Anzeigen werden im Folgenden beschrieben. Die Programmeinstellungen (Menüpunkt *Einstellungen*) werden normalerweise während des Praktikums nicht verändert (bis auf die Protokoll-Aktualisierungsrate) und sollten nur vom Assistenten vorgenommen werden. Alle Messwerte werden in regelmäßigen (einstellbaren) Zeitintervallen in eine Protokolldatei eingetragen.

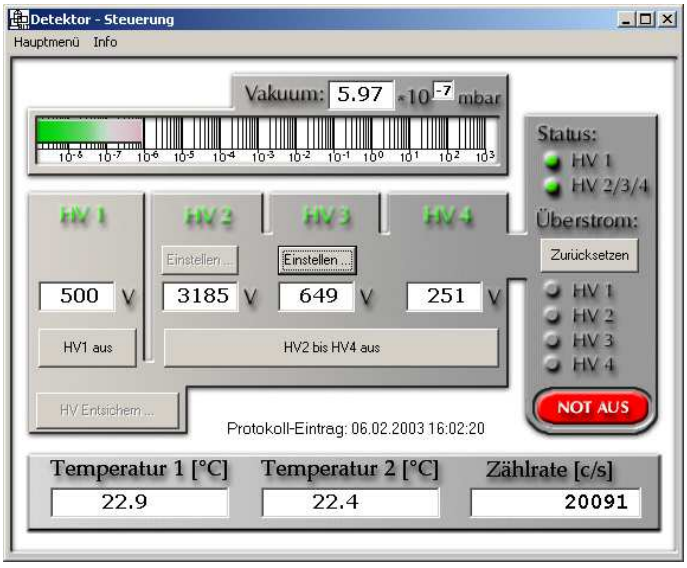

Abb. 3.6
Hauptfenster des Programms *HV-Kontrolle*.

3.6.1.1 Hauptfenster

Das Hauptfenster zeigt den Druck in der Vakuumanlage, die vier gemessenen Hochspannungswerte der Hochspannungsversorgung (HV) des Detektors, sowie das Auftreten zu hoher Stromwerte in den vier Hochspannungsmodulen. Außerdem werden zwei Temperaturwerte (außen und im Ladungsverstärker), die aktuelle Zählrate, sowie Datum und Uhrzeit des letzten Protokoll-Eintrags angezeigt.

Mit Buttons lassen sich die Hochspannungen einschalten. Vor dem Einschalten der Hochspannung muss die HV entsichert werden. Dazu ist zunächst zu bestätigen, dass das Ventil am Detektor auch tatsächlich geöffnet ist (nur dann ist die Druckanzeige auch für den Detektor gültig). Anschließend sind die Buttons für das Einschalten der HV für 5 Sekunden aktiv (*enabled*), nur in dieser Zeit ist ein Einschalten möglich. Damit soll ein versehentliches Einschalten verhindert werden, da dies unter Umständen katastrophale Folgen haben könnte.

3.6.1.2 Testimpulse

Mit dem Menüpunkt *Testimpulse* lassen sich die Testimpulse (siehe Kap. 2.3.4, S. 17) einschalten. Einzustellen sind die Frequenz der Testimpulse, die Taktrate, mit der die Impulse zwischen den verschiedenen Typen umgeschaltet werden, sowie die Auswahl der 6 zur Verfügung stehenden Testimpulstypen. Die ausgewählten Impulse werden mit der angegebenen Taktrate der Reihe nach eingeschaltet, da immer nur ein Testimpulstyp zur Zeit aktiv sein kann.

Abb. 3.7
Fenster *Testimpulse* des Programms *HV-Kontrolle*.

Sollen die Testimpulse auch während einer Bild-Integration laufen, so sollte die Frequenz auf 10 Hz oder 1 Hz gestellt werden, bei einer Frequenz von 1 Hz sollte außerdem die Umschalt-Taktrate auf 10 Sekunden eingestellt werden.

3.6.1.3 Testimpuls-Anzeige

Das Fenster *Testimpuls-Anzeige* zeigt zu dem ausgewählten Testimpulstyp Mittelwerte für die X-, Y- und Z-Werte aus jeweils 1000 Messwerten an. Außerdem wird die Standardabweichung berechnet und mit dem Faktor 2,35 multipliziert (DX, DY, DZ), was ein Maß für die Halbwertsbreite der Punktbildfunktion ergibt (siehe Gl. (2.4), S. 25). Die Werte für X und Y sind in Pixeleinheiten angegeben, während die Impulshöhe Z in Volt umgerechnet wurde (vergl. Oszillographen-Darstellung).

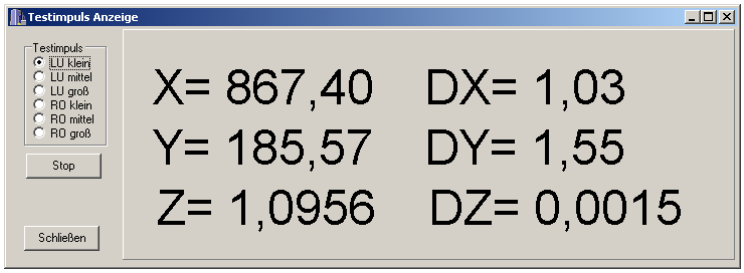

Abb. 3.8
Fenster *Testimpuls-Anzeige* des Programms *HV-Kontrolle*.

Wichtig für diese Anzeige ist, dass die Hochspannung ausgeschaltet ist, sonst wird die Auswertung allein schon durch die Dunkelstromereignisse verfälscht.

3.6.1.4 Testimpuls-Check

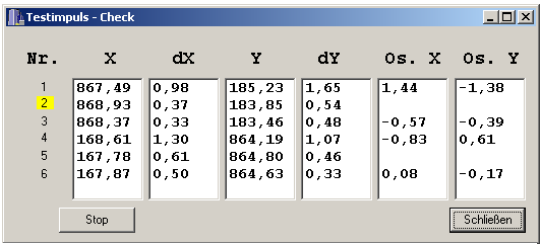

Abb. 3.9
Fenster *Testimpuls-Check* des Programms *HV-Kontrolle*.

Beim Testimpuls-Check erfolgt die gleiche Auswertung wie bei der Testimpuls-Anzeige. Allerdings werden hier alle 6 Testimpulstypen der Reihe nach eingeschaltet und die Messwerte in einer Tabelle angezeigt. Die Nummer des aktuellen Typs wird gelb unterlegt dargestellt, so dass man die Änderungen leichter verfolgen kann.

Zusätzlich werden in den Spalten Os. X und Os. Y die Differenzen der X- bzw. Y-Werte zwischen aufeinander folgenden Testimpulstypen berechnet: Os. X(1) = X(2) - X(1), Os. X(3) = X(3) - X(2), entsprechend für X(4) ... X(6) und für die Y-Werte. Damit lassen sich impulshöhenabhängige Verschiebungen erkennen, die in der Regel auf Offsetfehler zurückzuführen sind (siehe Kap. 2.5.4, S. 27).

Wie bei der Testimpuls-Anzeige ist es auch hier wichtig, dass die Hochspannung ausgeschaltet ist.

Diese Anzeige war auch in die Software der Bodenstation während des 2. ORFEUS-Fluges eingebaut. Damit konnte sehr schnell die Funktion der gesamten Detektor-Elektronik überprüft werden, insbesondere konnte auch verifiziert werden, dass die elektronische Auflösung genauso gut war, wie vor dem Flug gemessen.

3.6.1.5 Verstärkungsanzeige

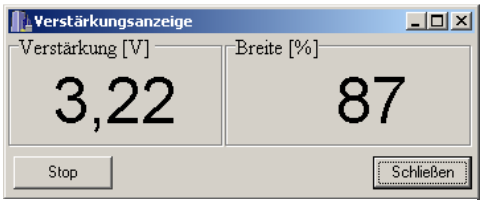

Abb. 3.10
Fenster *Verstärkungsanzeige* des Programms *HV-Kontrolle*.

Die Verstärkungsanzeige zeigt den Mittelwert der Z-Koordinate von mindestens 1000 Messwerten an (bei Zählraten über 1000 s^{-1} wird mindestens 1 Sekunde gemessen). Die Verstärkung wird in Volt (Summensignal) umgerechnet. Aus der Standardabweichung wird mit dem Faktor 2,35 ein Maß für die Halbwertsbreite berechnet und diese in Prozent des Verstärkungswertes angegeben. Nur für eine Normalverteilung würde dieser Wert auch der geometrischen Halbwertsbreite entsprechen. In den realen Impulshöhenverteilungen kommt dieser Wert der geometrischen Halbwertsbreite *FWHM* nur halbwegs nahe.

Diese Anzeige dient hauptsächlich der Einstellung von HV3 (siehe Abb. 3.6), mit der die Verstärkung des Detektors geregelt wird.

3.6.2 Programm *Erfassung*

Das Programm Erfassung dient der Durchführung von Integrationen von Detektor-Daten. Unter dem Hauptmenüpunkt *Daten* (Abb. 3.12) befinden sich die Punkte zum Aufruf der verschiedenen Integrations-Routinen. Die ersten vier Einträge enthalten die wichtigsten Funktionen. Die in Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf die Position des Wählschalters für den Integrationsmodus (siehe Kap. 3.3, S.

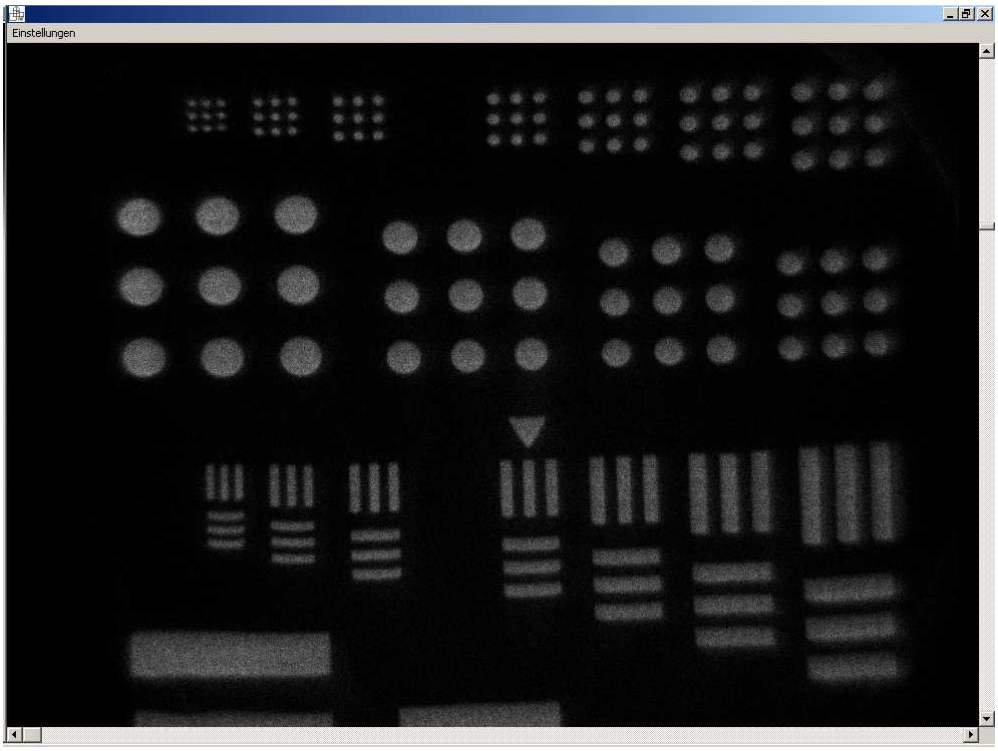

Abb. 3.11
Programm *Erfassung* während einer Bildintegration.

35, und Abb. 3.3). Falls der Wählschalter nicht in einer der angegebenen Positionen steht, erscheint der jeweilige Menüeintrag grau und ist nicht anwählbar.

3.6.2.1 Menüpunkt *Bild integrieren*

Der Menüpunkt *Bild integrieren* startet eine Bildintegration mit einer Auflösung von 1024 x 1024 Pixeln. Das aktuelle Bild wird alle 10 Sekunden neu auf dem Bildschirm (Hauptfenster) dargestellt (Abb. 3.11). Während der Integration ist in der Hauptmenüzeile nur der Eintrag *Einstellungen* sichtbar. Ein paar Menüpunkte erlauben die Änderung der Darstellung des Bildes auf dem Bildschirm (siehe Abb. 3.12). Die Integration wird mit der Taste *Integration Stop* am DPA (Abb. 3.3) beendet oder mit dem entsprechenden Menüpunkt unter *Einstellungen*.

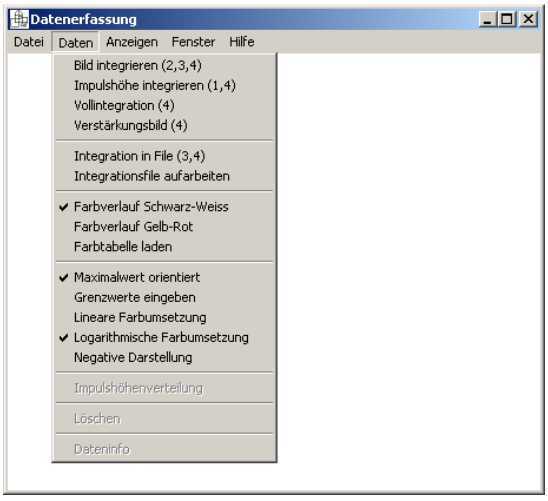

Abb. 3.12
Menüpunkte *Daten* des Programms *Erfassung*.

3.6.2.2 Menüpunkt *Impulshöhe integrieren*

Der Menüpunkt *Impulshöhe integrieren* startet die Integration einer Impulshöhenverteilung. Die aktuelle Verteilung wird in einem separaten Fenster (Abb. 3.13) alle 10 Sekunden neu dargestellt. Das Fenster lässt sich beliebig in der Größe einstellen. Es ist eine lineare oder eine doppelt logarithmische Darstellung möglich.

3.6.2.3 Menüpunkt *Vollintegration*

Der Menüpunkt *Vollintegration* startet eine gleichzeitige Bild- und Impulshöhenintegration.

3.6.2.4 Menüpunkt *Verstärkungsbild*

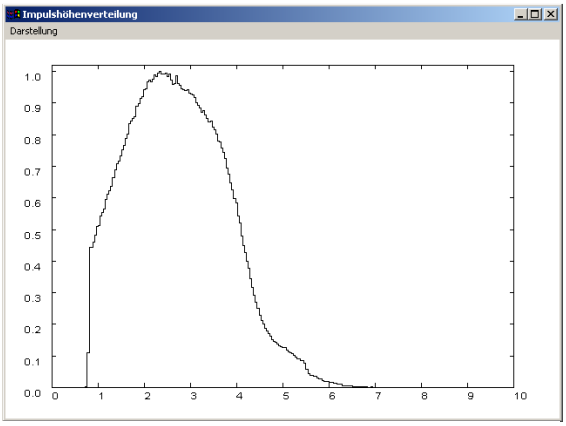

Abb. 3.13
Fenster der Impulshöhenverteilung während der Integration (lineare Darstellung).
X = Impulshöhe in Volt
Y = relative Häufigkeit

Der Menüpunkt *Verstärkungsbild* startet die Integration eines Verstärkungsbildes. Dabei wird für jeden Bildpunkt die mittlere Impulshöhe als Bildintensität dargestellt. Intern werden vom Programm 3 Bildspeicher verwendet: Im ersten wird ein normales Bild integriert, im zweiten werden die Z-Koordinaten zu jedem Ereignis aufsummiert, und im dritten wird für jeden Bildpunkt der Quotient aus Z-Wert-Summe und Photonenzahl gebildet. Abgebildet wird also die mittlere MCP-Verstärkung des Detektors. Die Anzeige lässt sich auf das normale Photonenbild (Anzahl Photonen pro Pixel) umschalten.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Vorbemerkungen

Während der Versuchsdurchführung sollten Sie die Messungen so protokollieren, dass Sie (und auch der Assistent) noch wesentlich später aus diesen Aufzeichnungen den Versuchsablauf nachvollziehen können. Dazu sollten Sie die Aufzeichnungen auch mit den Kapitelnummern der Versuchsdurchführung bzw. den Aufgabennummern beschriften. Die Aufzeichnungen sind später dem Protokoll beizuheften. **Lesen Sie dazu auch schon Kap. 4.13, S. 53**, und denken Sie insbesondere auch jetzt schon daran, alle Messwerte mit den zugehörigen Einheiten zu versehen. **Die Linsen bitte nicht mit den Fingern berühren!**

4.2 Einschalten

Führen Sie folgende Schritte in der angegebenen Reihenfolge aus:

- ggf. Vakuum-Pumpe einschalten (sollte bereits laufen), das Vakuum sollte besser als 10^{-6} mbar sein. Vergewissern Sie sich, dass das Detektor-Ventil geöffnet ist (Schraube bis zum Anschlag herausgedreht, ca. 14 mm).
- ggf. Digitaler Positions-Analysator einschalten
- ggf. Computer starten (**Windows XP!**) und einloggen
- Programm *HV-Kontrolle* starten
- Spannungsversorgung für die Hochspannungseinheit (Schalter am DPA, Abb. 3.3) einschalten
- Oszillograf (Gerät ganz unten) einschalten (Drehknopf ganz links unten)
- Speicherbildschirm (Gerät ganz oben) einschalten (Taste unten rechts herausziehen, Taste *STORE* **nicht** gedrückt, falls Lichtpunkt sichtbar: Intensität niedriger stellen)
- Klicken Sie im Programm *HV-Kontrolle* unter *Überstrom* auf *Zurücksetzen*
- Rufen Sie im Programm *HV-Kontrolle* den Menüpunkt *Protokolldatei löschen ...* auf, um eine neue Protokolldatei zu beginnen. Stellen Sie unter *Einstellungen* im Kasten *Protokoll-Einstellungen* die Aktualisierungsrate auf 60 s.

4.3 Testimpulse

Zu Beginn führen wir einen Checkout der Elektronik durch. Rufen Sie dazu im Programm *HV-Kontrolle* den Menüpunkt *Testimpulse* auf und starten Sie die Testimpulse. Auf dem Oszillografen sollten Sie die Testimpulse erkennen, die im Sekundentakt die Größe ändern. Auf dem Speicherbildschirm sollte der Testimpuls alle 3 Sekunden von einer Ecke in die gegenüberliegende wechseln. Messen Sie auf dem Oszillografen die Impulshöhe (Wert des Maximums), indem Sie in dem Fenster *Testimpulse* nur einen auswählen. **Achten Sie darauf, dass die Feinregler für die VOLT/DIV-Einstellung in der Stellung „Cal“ eingerastet sind!** Notieren Sie die Werte für alle 6 Testimpulstypen.

Stoppen und schließen Sie die *Testimpulse*, und rufen Sie den Menüpunkt *Testimpuls-Anzeige* auf. Notieren Sie den Z-Wert (Anzeige in V) für jeden Testimpulstyp. Stoppen Sie die Testimpulse und schließen Sie die *Testimpuls-Anzeige* wieder.

Aufgabe 9:

Tragen Sie Ihre Messwerte und die Z-Werte für alle Testimpulstypen in eine Tabelle ein. Wie gut stimmen Ihre Messwerte mit den Z-Werten überein? Überlegen Sie, wie groß die Ablesegenauigkeit auf dem Oszillographen ist und bilden Sie die Differenzen der Messwerte mit den entsprechenden Z-Werten.

Rufen Sie den Menüpunkt *Testimpuls-Check* auf und starten Sie ihn. Fertigen Sie nach 2 (oder mehr) Durchläufen einen Schnappschuss von dem Fenster an: Programm *PaintShop Pro* starten, dort auf das Kamera-Symbol klicken, dann mit der **rechten** Maustaste auf das Fenster *Testimpuls-Check* klicken (zuvor über den Menüpunkt *Datei / Import / Schnappschuss / Setup…* den Punkt *Fenster* auswählen).

Verbinden Sie mit Bananensteckerkabeln das Detektorgehäuse mit der Vakuumanlage (die normalerweise isoliert mit dem Detektor verbunden ist). Beobachten Sie die Werte der Testimpulsbreiten dX und dY. Fertigen Sie einen weiteren Schnappschuss an und beenden Sie den Testimpuls-Check.

Aufgabe 10:

Drucken Sie die beiden Schnappschüsse für Ihr Protokoll aus. Beschreiben Sie die wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Messungen und nennen Sie die Gründe dafür (falls Unterschiede vorhanden).

Entfernen Sie anschließend die Verbindung der Bananensteckerkabel wieder!

4.4 Einschalten der Hochspannung

Entfernen Sie alle Komponenten bis auf Lampe und Kondensor von der optischen Bank und positionieren Sie den Kondensor etwa 40 cm vor der Lampe. An der Lampe muss die Streuscheibe angebracht sein. **Die optischen Komponenten bitte nicht mit den Fingern berühren!**

Klicken Sie auf *HV entsichern*, vergewissern Sie sich, dass das Detektor-Ventil geöffnet ist, klicken Sie die zutreffende Option an und klicken Sie auf *OK*. Klicken Sie nun **innerhalb von 5 Sekunden** auf ***HV2 bis HV4 ein*** (HV1 bleibt aus). Die Hochspannung ist nun eingeschaltet und auf dem Detektor sollten Impulse erscheinen. Stellen Sie den Zählraten-Wählschalter am DPA auf *Total Pulses*.

Schalten Sie die Lampe ein und drücken Sie die Taste *STORE* des Speicherbildschirms. Es dauert etwa eine Minute, bis die Lampe mit voller Intensität brennt. In der Zeit wächst die Zählrate kontinuierlich an. Stellen Sie durch Verschieben des Kondensors eine Zählrate von etwa 10.000 s^{-1} ein.

Starten Sie im Programm *HV-Kontrolle* den Menüpunkt *Verstärkungsanzeige*. Klicken Sie ebenfalls im Programm *HV-Kontrolle* unter **HV3** auf *Einstellen* und verändern Sie den Hochspannungswert in 10 V Schritten bis eine Verstärkung von 3,0 V angezeigt wird. Notieren Sie den eingestellten Hochspannungswert (auch später immer, wenn Sie den Wert verändern). Beenden Sie die HV3-Einstellung und die Verstärkungsanzeige (erst stoppen, dann schließen).

4.5 Dunkelstrom

Schalten Sie die Lampe wieder aus und verschließen Sie das Detektor-Fenster, indem Sie die dazu vorgesehene Blende in den Schlitz vor dem Detektorfenster schieben. Schalten Sie am DPA die

Zähldauer des Impulszählers auf 10 s. Notieren Sie 10 Zählermesswerte und bestimmen Sie den Mittelwert. Die Zähleranzeige ist gültig, wenn die grüne Leuchtdiode rechts neben der Anzeige aufleuchtet, der Wert wird jeweils 1 s lang angezeigt.

4.6 *Was bedeutet solar blind?*

Entfernen Sie die Blende vor dem Detektorfenster wieder. Der Detektor ist jetzt dem Raumlicht ausgesetzt, die Zählrate ist höher als bei völliger Dunkelheit. Notieren Sie 10 Zählermesswerte (Zähldauer immer noch 10 s). Bestimmen Sie den Mittelwert (in s^{-1}) und ziehen Sie den Wert des Dunkelstroms ab. Schalten Sie anschließend die Zähldauer am DPA wieder auf 1 s.

Benutzen Sie das Luxmeter, um die Beleuchtungsstärke auf der Detektorfläche zu bestimmen. Halten sie dazu die Messzelle vor den Detektor und bestimmen Sie die Beleuchtungsstärke in Lux.

Die Beleuchtungsstärke in Lux (= Lumen/m²) ist eine photometrische Größe, sie berücksichtigt die spektrale Empfindlichkeit des Auges (Hellempfindlichkeitsgrad, Abb. 4.1). Die Beleuchtungsstärke muss näherungsweise in eine physikalische Größe (Watt/m²) umgerechnet werden. Der Umrechnungsfaktor heißt Photometrisches Strahlungsäquivalent und ist wellenlängenabhängig (Abb. 4.1).

Aufgabe 11:

Geben Sie die vom Umgebungslicht erzeugte Zählrate in Counts/s an.
Schätzen Sie aus Abb. 4.1 einen sinnvoll gemittelten Wert für das Photometrische Strahlungsäquivalent unter unseren Lichtbedingungen. Legen Sie außerdem eine sinnvolle mittlere Wellenlänge des Umgebungslichts fest.
Berechnen Sie mit diesen beiden Werten die Anzahl der pro Sekunde auf den Detektor auftreffenden Photonen.
Berechnen Sie daraus die mittlere Empfindlichkeit (Quantenausbeute) des Detektors für sichtbares Licht.
Wie viele Impulse würde ein 1 mW He-Ne-Laser also auf einem Detektor mit dieser Empfindlichkeit schätzungsweise erzeugen (wenn die Empfindlichkeit nicht wellenlängenabhängig wäre)?

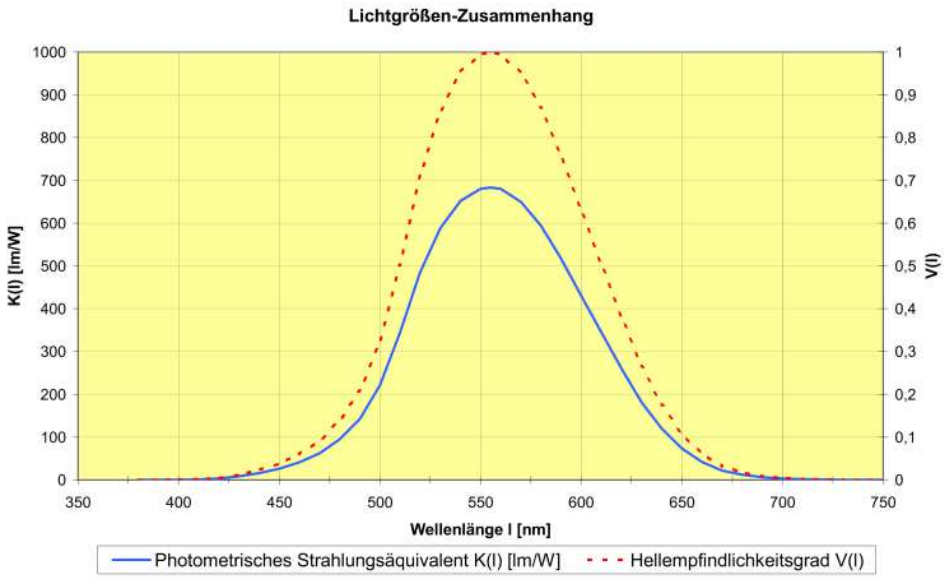

Abb. 4.1
Zusammenhang zwischen photometrischen und physikalischen Lichtgrößen (Quelle: `http://www.reitmayer.de/phligroe.html` (veraltet), siehe auch: Heinrich Reitmayer, Dissertation, TU München, 2000).

4.7 Impulshöhenverteilung

4.7.1 Vollbild

Schalten Sie die Lampe wieder ein und starten Sie die Verstärkungsanzeige des Programms *HV-Kontrolle*. Regeln Sie HV3 so ein, dass die Verstärkungsanzeige wieder bei 3,0 V liegt. Notieren Sie die angezeigten Werte für Verstärkung und Breite **jeweils vor und nach** der Impulshöhenintegration. Schalten Sie die Verstärkungsanzeige während der Impulshöhenintegration aus.

Stellen Sie den Integrationsmodus am DPA auf Position 4 (*x, y, t, z*). **Denken Sie daran, den DPA-Zeitzähler vor jeder Messung auf 0 zu stellen.** Rufen Sie das Programm *Erfassung* auf und starten Sie eine Impulshöhen-Integration (siehe Kap. 3.6.2.2, S. 40). Stoppen Sie die Integration, wenn die Kurve ausreichend glatt aussieht (ca. 200 s). Stellen Sie einen Schnappschuss von diesem Fenster her und drucken Sie ihn aus. Vergessen Sie nicht die zweite Messung der Verstärkungsanzeige!

4.7.2 Teilbild

Führen Sie dies anschließend auch für eine Teilbild-Einstellung (Image Window: X=2, Y=0) aus und notieren Sie auch hier die Verstärkungswerte **vor und nach** der Impulshöhenintegration. **Anschließend Teilbild-Einstellung wieder auf X=9, Y=9 stellen.**

Aufgabe 12:

Bestimmen Sie in den Plots der Impulshöhenverteilungen jeweils die Lage des Maximums der Verteilung und die geometrische Halbwertsbreite FWHM. Sie sollten dies in die Grafik einzeichnen, die Werte in cm ausmessen und den Umrechnungsfaktor in V/cm zur Berechnung der Volt-Werte angeben. Geben Sie die Halbwertsbreite in Prozent der Maximumsposition an.
Worin liegt die Ursache für die Unterschiede (Maximum und FWHM) der Vollbild- und der Teilbild-Messung? Vergleichen Sie Ihre grafisch ermittelten Werte für Verstärkung und Breite mit den von der Verstärkungsanzeige notierten. Warum unterscheiden sich die Werte der Computeranzeige (Mittelwerte der Messungen vor und nach der Integration bilden) für Verstärkung und Breite von den grafisch ermittelten Werten? Wie bestimmt der Computer die Werte für Verstärkung und Breite?

4.8 Ausgasen

Stellen Sie im Programm *HV-Kontrolle* unter *Einstellungen* die Aktualisierungsrate für die Protokolleinträge auf 5 s. Starten Sie die Verstärkungsanzeige, regeln Sie HV3 bis zur Verstärkung von 3 V nach, falls notwendig. **Lassen Sie die Verstärkungsanzeige für diese Messung eingeschaltet**, damit die Werte automatisch in das Protokoll übernommen werden.

Schieben Sie den Kondensor langsam in Richtung Lampe, bis sich eine Zählrate (Total Pulses) von 50.000 s^{-1} ergibt. Stellen Sie nach 5 Minuten wieder eine Zählrate von 10.000 s^{-1} ein und warten Sie nochmals 5 Minuten (in der Zwischenzeit können Sie sich bereits mit Aufgabe 14 befassen). **Stellen Sie anschließend die Aktualisierungsrate wieder auf 60 s** und beenden Sie die Verstärkungsanzeige.

Rufen Sie die Excel-Datei *Protokoll.xls* auf und starten Sie das Makro *ProtokollImport*. Damit werden die aktuellen Protokolldaten des Programms *HV-Kontrolle* eingelesen. Die vorbereiteten Grafiken werden automatisch aktualisiert.

Aufgabe 13:

Stellen Sie den Verlauf der Verstärkung und des Drucks grafisch dar und drucken Sie die Grafik aus. Erläutern Sie das Ergebnis: Warum steigt der Druck an? Warum fällt die Verstärkung ab? Was passiert nach Rückgang der Zählrate auf 10.000 s^{-1}?

4.9 Flat Field und Verstärkungsbild

Nehmen Sie die große Streuscheibe aus dem Schutzgehäuse und hängen Sie sie vor das Detektorfenster. Stellen Sie eine Zählrate von etwa 20.000 s^{-1} ein. Regeln Sie auf eine Verstärkung von 3 V ein.

Starten Sie eine Verstärkungsbild-Integration (siehe Kap. 3.6.2.4, S. 41). Tragen Sie die Integrations-Parameter in das Startfenster ein und vergeben Sie einen eindeutigen Dateinamen.

Die Integration sollte mindestens solange dauern, bis ein Signal-Rausch-Verhältnis von 10 in den belichteten Bildpunkten erreicht ist. Es empfiehlt sich, diese Integration über die Mittagszeit laufen zu lassen.

Aufgabe 14:

*Welchen Wert pro Pixel benötigen Sie für ein Signal-Rausch-Verhältnis von 10? Berechnen Sie die benötigte Integrationszeit aus der Anzeige der **Aktiven Impulsrate** (ca. 900x900 belichtete Pixel). Erzeugen Sie mit IDL und dem Programm **auswertung** Ausdrucke der beiden Bilder. (Bildschirm auf 256 Farben einstellen!)*

4.9.1 Homogenität

Diese Auswertung kann zunächst übersprungen und nach Beendigung aller Messungen durchgeführt werden.

Beurteilen Sie die kleinräumige Homogenität des Flatfield-Bildes. Erzeugen Sie dazu ein Histogramm von einem möglichst homogen erscheinenden Bildausschnitt (IDL-Programm *Auswertung*, Menüpunkt *Auswertung/Statistik fuer Bildausschnitt*) und drucken Sie dieses aus (Menüpunkt *Export/Plot-Hardcopy*).

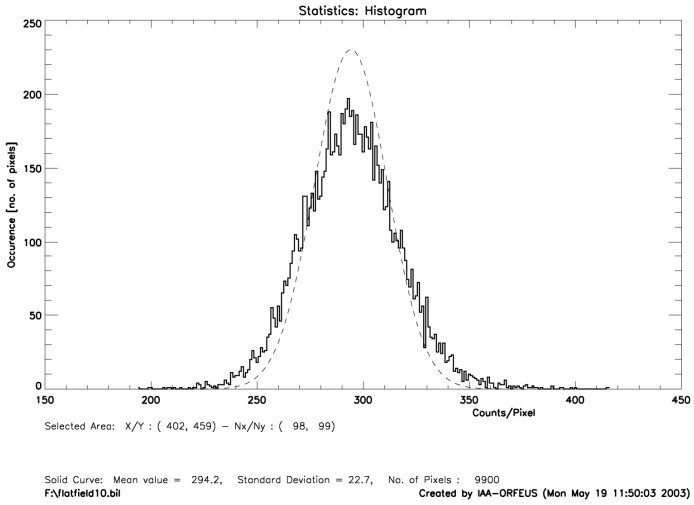
Statistics: Histogram
Occurence [no. of pixels]
Counts/Pixel
Selected Area: X/Y : (402, 459) – Nx/Ny : (98, 99)
Solid Curve: Mean value = 294.2, Standard Deviation = 22.7, No. of Pixels : 9900
F:\flatfield10.bil
Created by IAA-ORFEUS (Mon May 19 11:50:03 2003)

Abb. 4.2
Histogramm der Intensitätsverteilung eines Bildausschnitts. Die gestrichelte Kurve gibt eine Poissonverteilung mit dem gleichen Mittelwert wieder.
Die im Ausdruck angegebenen Werte beziehen sich auf die Messwerte, nicht auf die theoretische Kurve!

Falls die Intensitätsschwankungen der einzelnen Pixel einzig auf statistische Schwankungen zurückzuführen sind, muss das Histogramm mit einer Poissonverteilung übereinstimmen. Da wir es mit einem relativ großen Mittelwert (~100) und einer relativ großen Anzahl von

Messwerten (=Anzahl der Pixel) zu tun haben, kann die Poissonverteilung sehr gut durch eine Gaußverteilung angenähert werden (mit $\sigma = \sqrt{Mittelwert}$).

Abb. 4.2 zeigt ein solches Histogramm. Als gestrichelte Kurve ist eine Gaußverteilung mit gleichem Mittelwert eingezeichnet. Man sieht, dass die theoretische Kurve nicht exakt auf der gemessenen Kurve liegt. Die Intensitätsschwankungen von Pixel zu Pixel sind daher nicht allein auf statistische Schwankungen zurückzuführen. Es gibt systematische Fehler, die Homogenität ist also nicht optimal.

Aufgabe 15:

Beurteilen Sie die Homogenität in dem von Ihnen gewählten Bildausschnitt durch Vergleich des ausgeplotteten Histogramms mit der eingezeichneten theoretischen Gaußkurve. Geben Sie die vollständige Formel für diese gestrichelte Gaußkurve auf Ihrem Ausdruck an (3 Parameter, die sich aus den im Plot angegebenen Zahlen bestimmen lassen!) und überprüfen Sie Ihre Formel durch Berechnung von 2 Zahlenwerten (in einer Flanke der Kurve und nahe des Maximums der Kurve – in die Grafik einzeichnen). Begründen Sie die verwendeten Zahlenwerte der drei Parameter in der Formel.

4.10 Brennweitenbestimmung nach dem Besselverfahren

Positionieren Sie den Kondensor ca. 40 cm vor der Lampe, entfernen Sie danach die Streuscheibe vor dem Detektor und bauen Sie die optischen Komponenten auf der optischen Bank folgendermaßen auf:

- Lampe mit Streuscheibe
- Testmaske etwa 90 cm von der Frontfläche des Detektorgehäuses entfernt
- Kondensor zwischen Lampe und Testmaske
- Quarzlinse zwischen Detektor und Testmaske, abgeblendet auf 35 mm Öffnung, näher an der Testmaske als am Detektor

Die Brennweitenbestimmung nach dem Besselverfahren beruht darauf, dass es bei einem vorgegebenen Abstand *e* zwischen Objekt und Bildebene von mehr als der vierfachen Brennweite zwei Linsenpositionen gibt, bei denen das Objekt scharf auf die Bildebene abgebildet werden kann. Bestimmt man den Abstand dieser beiden Linsenpositionen zu *d*, so errechnet sich die Brennweite *f* einer dünnen Linse nach folgender Formel (Bergmann / Schäfer, 1962):

$$f = \frac{e^2 - d^2}{4e} \qquad (4.1)$$

Bestimmen Sie zunächst den Abstand *e* zwischen Testmaske und MCP-Oberfläche. Dazu messen Sie den Abstand der Testmaske zur Frontfläche des (goldfarbenen) Detektorgehäuses (alle Abstandsmessungen auf 1 mm genau). Addieren Sie nun den Abstand vom Detektorgehäuse zur MCP-Oberfläche, dessen optische Weglänge von 25 mm sich wie folgt berechnet: Der mechanische Abstand beträgt von 26,7 mm. Das Quarzfenster hat eine Dicke von 5 mm, der Brechungsindex von Quarz beträgt bei einer Wellenlänge von 254 nm 1,5. Damit beträgt die optische Weglänge durch das Fenster nur 5 mm / 1,5 = 3,3 mm, die Verkürzung beträgt also 1,7 mm. Somit erhalten Sie den Wert *e*, indem Sie zum Abstand Testmaske - Frontfläche noch **25 mm hinzu addieren**.

Als nächstes müssen Sie die beiden Linsenpositionen bestimmen, bei denen Sie eine scharfe Abbildung der Testmaske auf dem Detektor erhalten. Beginnen Sie mit der Position nahe der Testmaske. Stellen Sie zunächst anhand des Echtzeitbildes auf dem Speicherbildschirm scharf. Stellen Sie die Zählrate auf ca. 10.000 s^{-1} ein durch Verschieben des Kondensors. Anschließend starten Sie eine Bildintegration für eine bestimmte Zeit (z.B. 100 s). Stoppen Sie die Integration nach dieser Zeit und stellen Sie mit PaintShop Pro einen Schnappschuss von einem aussagekräftigen Bildausschnitt her (zuvor einmalig über den Menüpunkt *Datei / Import / Schnappschuss / Setup…* die Option *Bereich* auswählen). Verschieben Sie anschließend die Linse um 2 mm und notieren Sie jeweils die Linsenposition auf der optischen Bank (am besten an der der Lampe zugewandten Seite des Reiters). Integrieren Sie für die gleiche Zeit wie zuvor und erzeugen Sie wieder einen Schnappschuss vom gleichen Ausschnitt. Vergleichen Sie die Ausschnitte und beurteilen Sie, in welche Richtung Sie die Linse weiter verschieben müssen. Wiederholen Sie dies, bis Sie die optimale Position gefunden haben.

Verfahren Sie genau so für die Linsenposition in Detektornähe. Stellen Sie dabei eine Rate von 3000 s^{-1} ein. Bestimmen Sie den Abstand der beiden Reiterpositionen auf der optischen Bank: Dies ist Ihr Wert *d*.

Bestimmen Sie außerdem die Brennweite für sichtbares Licht durch Abbildung eines sehr weit entfernten Gegenstandes auf einen Schirm.

Aufgabe 16:

Berechnen Sie die Brennweite der Linse für eine Wellenlänge von 254 nm nach Gl. (4.1). Vergleichen Sie diesen Wert mit der gemessenen Brennweite für sichtbares Licht. Woher kommt der Unterschied?

4.11 Totzeit und Effizienz

Stellen Sie durch Verschieben des Kondensors eine Zählrate (Total Pulses) von 100.000 s^{-1} ein. Der Druck darf dabei nicht über 1-2 · 10^{-6} mbar ansteigen, sonst schaltet die Drucküberwachung die Hochspannung aus! Regeln Sie gegebenenfalls die Verstärkung auf etwa 2,0 V ein, bzw. reduzieren Sie den HV3-Wert um 20V.

Notieren Sie die Zählerwerte für alle Impulse, die aktiven Impulse, und die beiden Diskriminatorschwellen. Reduzieren Sie durch Verschieben des Kondensors die Zählrate (Total Pulses) schrittweise um 10.000 s^{-1} und notieren Sie jeweils alle vier DPA-Zählerwerte (messen Sie zusätzlich auch bei 75.000 s^{-1}).

Wichtig:

Beim Ablesen der Zählerwerte für die aktiven Impulse darf die Verstärkungsanzeige **nicht** aktiv sein!

Aufgabe 17:

Erstellen Sie eine Excel-Tabelle mit den Messwerten. Berechnen Sie für „Total Pulses“ und „Untere Schwelle“ eine Totzeitkorrektur nach Gl. (2.24), S. 31, mit einer Zähler-Totzeit von 2 µs. Berechnen Sie die Effizienz = (Aktive Impulse) / (Untere Schwelle - Obere Schwelle).
Berechnen Sie theoretische Werte für die Effizienz nach Gl. (2.22), S. 31 (vergl. Abb. 2.29). Stellen Sie die Werte grafisch dar. Verwenden Sie die (Detektor-)Totzeit als Parameter, der in einem Tabellenfeld gespeichert wird. Ändern Sie diesen Wert solange, bis die theoretische Kurve gut zu den Messwerten passt.
Bestimmen Sie n_{max} für diese Totzeit nach Gl. (2.23), S. 31. Vergleichen Sie dieses n_{max} mit Ihrem Maximalwert für Aktive Impulse.

4.12 Linearitätseichung

4.12.1 Messaufbau

Bauen Sie die optische Bank folgendermaßen um:

- Ersetzen Sie die Streuscheibe vor der Lampe durch eine kleine Lochblende. Lampe dazu ausschalten!
- Entfernen Sie den Kondensor und stellen Sie die Linse 17,5 cm vor die Lampe (Irisblende offen!).
- Schieben Sie die Lochkreuzblende in die Halterung direkt vor dem Detektorfenster. Die Lochkreuzblende besitzt ein Muster aus drei waagerechten und drei senkrechten Linien, die aus Löchern von 0,2 mm im Abstand von 0,5 mm bestehen. Um die Orientierung feststellen zu können ist im unteren rechten Viertel der Schriftzug **AIT**, ebenfalls aus Lochlinien, angebracht.

Schalten Sie die Lampe ein. Es sollte sich eine Zählrate von über 300 s^{-1} ergeben. Die Intensität sollte möglichst gleichmäßig über die Linien verteilt sein (Überprüfung am Speicherbildschirm).

4.12.2 Messung

Stellen Sie ggf. wieder eine Verstärkung von 3V ein und integrieren Sie ein Bild mit einer Dauer von 15 min. Speichern Sie das Bild in Ihrem Gruppenverzeichnis.

Hinweis:

> Da Ihre Messungen damit beendet sind, sollten Sie nach der Messung die Hochspannung im Programm *HV-Kontrolle* ausschalten und anschließend die Oszillographen und die Lampe ebenso wie die HV-Spannungsversorgung am DPA abschalten. Stellen Sie die Protokoll-Aktualisierung wieder auf 3600 s ein.

Zur Auswertung mit dem Programm IDL ändern Sie zunächst die Bildschirmeinstellungen auf eine Farbtiefe von 256 Farben, andernfalls funktionieren die Farbeinstellungen in IDL nicht.

Starten Sie IDL und rufen Sie das Programm ***auswertung*** auf. Mit diesem Programm wurde ursprünglich die Auswertung der *ORFEUS*-Messungen vorgenommen. Laden Sie das aufgenommene Bild.

Ihre Aufgabe ist es nun, die X-Positionen der Lochpunkte der mittleren horizontalen Linie zu vermessen um daraus die (Nicht-)Linearität des Detektors zu bestimmen. Dazu müssen Sie stückweise Schnitte entlang dieser Linie extrahieren und an die geplottete Kurve eine Reihe von Gauß-profilen anpassen. Die Zentren dieser

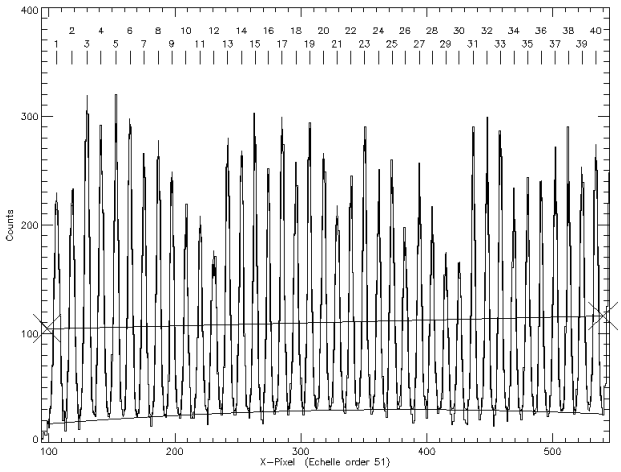

Abb. 4.3
Schnitt entlang einer Lochreihe, gefittet mit einem Auto-Gaußfit mit 40 Gaußkurven. Der Untergrund wird dabei als Parabel angepasst.

Gaußprofile sind die Positionen der Löcher der Blende.

Das Programm ***auswertung*** kann einen Schnitt durch vorgegebene Anfangs- und End-Punkte plotten und an beliebigen Stellen mehrere Gaußfunktionen an die geplottete Kurve anpassen. Die Daten der Gaußkurven werden in einem Protokoll automatisch erfasst (dazu darf das Programm zwischendurch nicht verlassen und neu gestartet werden, da dann eine neue Protokolldatei angelegt wird).

Sie sollten nun Schnitte anlegen, die etwa 40 Punkte der Linie umfassen. In jedem dieser Schnitte können Sie einen Auto-Gaußfit über diese Maxima ausführen. Auf diese Weise können Sie die Zentren aller etwa 80 Punkte entlang der mittleren horizontalen Linie vermessen. Gehen Sie folgendermaßen vor:

- Kontrollieren Sie unter **Einstellungen/Plot-Eichung**, dass der Punkt **X=Pixel, Y=Counts** markiert ist.
- Rufen Sie den Menüpunkt **Auswertung/Schnitt** auf.
- Klicken Sie im Bild erst auf den (linken) Startpunkt (der letzte zur Maximumsbestimmung verwendete Punkt) und anschließend auf den (rechten) Endpunkt (der 11. darauf folgende Punkt) der zu plottenden Linie. Dabei wird aus dem Bild eine Line extrahiert, die eine voreingestellte Breite an Bildpunkten umfasst (angezeigt unter Menüpunkt **Einstellungen/ Schnittbreite**). Sinnvoll ist eine (ungerade) Breite von 11 bis 21 Pixeln. Damit ist gewährleistet, dass die Lochbilder in der vollen Breite erfasst werden.
- Rufen Sie anschließend den Menüpunkt **Auswertung/Auto-Gaussfit ueber Schnitt** auf.
- Im Schnittfenster markieren Sie (mit der linken Maustaste) zunächst die linke Position: Die x-Position soll im Bereich des ersten Minimums und die y-Position etwa auf halber Höhe zwischen Minimum und Maximum liegen. Anschließend markieren Sie das letzte Minimum. Die angeklickten Punkte werden mit schrägen Kreuzen markiert (siehe Abb. 4.3). Achten Sie darauf, dass die Verbindungslinie zwischen beiden Markierungen alle Peaks einmal schneidet. Zum Beenden klicken Sie mit der **rechten** Maustaste in das Schnittfenster. Es wird nun die Kurve aus den angepassten Gaußkurven in das Schnittfenster eingezeichnet (Abb. 4.3). Kontrollieren Sie, ob alle Maxima korrekt gefittet wurden. Fehlerhafte Fits können Sie einfach noch einmal wiederholen, das Plotfenster können Sie dazu mit dem Menüpunkt **Auswertung/letzten Schnitt wiederholen** aktualisieren.

Nachdem Sie alle Lochpositionen bestimmt haben beenden Sie das Programm und kopieren Sie die Datei *logfile.txt* aus dem Hauptverzeichnis in Ihr Gruppenverzeichnis.

4.12.3 Auswertung

Für jeden durchgeführten Gaußfit sind in *logfile.txt* folgende Einträge enthalten:

```
Kurve Nr. 1:
Schwerpunkt  :        97.196253  =  1107.9357 A
Amplitude    :        58.749829
Breite (FWHM):        5.2349586  =  0.15797641 A
Wl / d Wl    :        7013.2984
```

Wichtig für Ihre Auswertung ist nur der Eintrag hinter *Schwerpunkt*, dort ist das Zentrum der Gaußkurve in Pixeln (und dahinter umgerechnet als Wellenlänge in Å) angegeben. Diese Pixelwerte sind Ihre Messwerte. Die zugehörigen wahren Ortspositionen sind die Mittelpunkte der Löcher in der Blende, die untereinander einen Abstand von 0,5 mm haben. **Falls Sie einen der Fits wiederholt hatten, löschen Sie die ungültigen Einträge mit einem Texteditor.** Kontrollieren Sie, dass alle Einträge vorhanden sind (annähernd gleiche Abstände zwischen den Einträgen, aufsteigend sortiert).

Zur Auswertung öffnen Sie die Excel-Datei *Auswertung_Linearitaet.xls* in Ihrem Gruppenverzeichnis. Importieren Sie mit Hilfe des Makros **Linearitaetsmessung_importieren** die Datei *logfile.txt*. In der Spalte **Pixel-Position** werden aufsteigend alle Gauß-Schwerpunkte eingetragen. Die Spalte **Wahre Position [mm]** wird mit Werten im Abstand von 0,5 mm aufgefüllt, beginnend bei 0 mm. Die restlichen Spalten sind in der ersten Zeile mit Formeln vorbelegt. Die Zeilen werden soweit aufgefüllt, wie die Messwerte reichen. Es handelt sich um folgende Spalten:

- **Gerade [Pixel]**: Hier wird eine Gerade berechnet, die als Referenz für die Messwerte dienen soll. Durch Differenzbildung lassen sich Abweichungen der Messwerte von einer Geraden einfacher erkennen. Die beiden Geraden-Parameter Steigung und Randwert werden automatisch in die Zellen B2 und B3 eingetragen. Sie können die Werte auch probehalber verändern und später mit der Schaltfläche **Gerade bestimmen** wieder berechnen lassen. Lassen Sie sich dazu auch das Blatt **Diagramm 2** anzeigen.
- **Differenz (Messung - Gerade)**: Hier wird die Differenz zwischen den Messwerten und der berechneten Geraden eingetragen. Diese Spalte wird im Diagramm unter der Bezeichnung *Messung* dargestellt. Falls Sie die Geraden-Parameter ändern, sollten Sie sie so wählen, dass sich für die Messwerte im Diagramm eine symmetrische Kurve ergibt (siehe Abb. 4.4). Die Kurve wird im Blatt **Diagramm 1** dargestellt.

Sie sollen nun anhand der beiden Parameter für Übersprechen (*b*, siehe Kap. 2.5.3, S. 27) und Verstärkungsunterschied (*a*, siehe Kap. 2.5.3, S. 27) eine theoretische Eichkurve erzeugen und dabei die Parameter so anpassen, dass sie möglichst gut zu Ihrer Messung passen. Parameter *b* (Übersprechen) wirkt sich auf die Steigung der theoretischen Kurve aus, während Parameter *a* (Verstärkungsunterschied) die Krümmung der theoretischen Kurve bestimmt. Da der Nullpunkt der wahren Position willkürlich gewählt ist, müssen wir noch einen weiteren Parameter vorsehen: die Nullpunktsverschiebung. Die folgenden Spalten berechnen die theoretischen Werte (vollziehen Sie Formeln im Excelblatt am Bildschirm nach):

- **Theorie (Übersprechen)**: Diese Spalte enthält die Formel aus Gleichung (2.10). Da das *x* in dieser Formel ein normierter Wert zwischen 0 und 1 ist, müssen wir unsere wahre Position auf die aktive Anodenbreite von 44 mm beziehen. In der Excel-Formel wird daher die wahre Position um die Nullpunktsverschiebung korrigiert und dann durch 44 dividiert. Um die Formel übersichtlicher zu halten, wurden die Ausdrücke 1-*b* und 1+*b* in den Zellen D5 und F5 berechnet.
- **Theorie (Verstärkungsdifferenz)**: Diese Spalte enthält die Formel aus Gleichung (2.12). Als Eingangswert *x* wird das Ergebnis der vorigen Berechnung aus Spalte F verwendet, welches bereits in normierter Form vorliegt. Um das Ergebnis aber mit unseren Pixelwerten vergleichbar zu machen, müssen wir das normierte Ergebnis *x*' mit unserem Maximalwert 1023 multiplizieren.
- **Theorie - Gerade**: Diese Spalte entspricht den Werten (Messung - Gerade) und wird ebenfalls im Diagramm dargestellt. Die Parameter für Verstärkungsdifferenz, Übersprechen und Nullpunkt sind so zu wählen, dass die beiden Kurven bestmöglich zur Deckung kommen. Um die Güte der Anpassung besser beurteilen zu können, zeigt die nächsten Spalte die Differenz zu den Messwerten.
- **Messung - Theorie**: Diese Spalte wird ebenfalls im Diagramm dargestellt, aber mit einer eigenen Y-Skala, so dass die Abweichungen der beiden Kurven besser sichtbar werden (siehe Abb. 4.4). Die drei Parameter sollten so gewählt werden, dass die Kurve möglichst dicht um Null herum verläuft.

Aufgabe 18:

Erstellen Sie die Excel-Datei wie beschrieben und passen Sie die Parameter optimal an (das Diagramm sollte etwa so wie in Abb. 4.4 aussehen). Drucken Sie das erhaltene Diagramm für das Protokoll aus und notieren Sie alle Parameter.

Da bei der Änderung jedes der Parameter *a* und *b* auch der Wert für den Nullpunkt neu angepasst werden muss, gibt es dazu die Schaltfläche **Nullpunkt bestimmen**. Nach Klicken auf diese Schaltfläche wird die rote Differenzkurve wieder in die Mitte der Grafik geschoben.

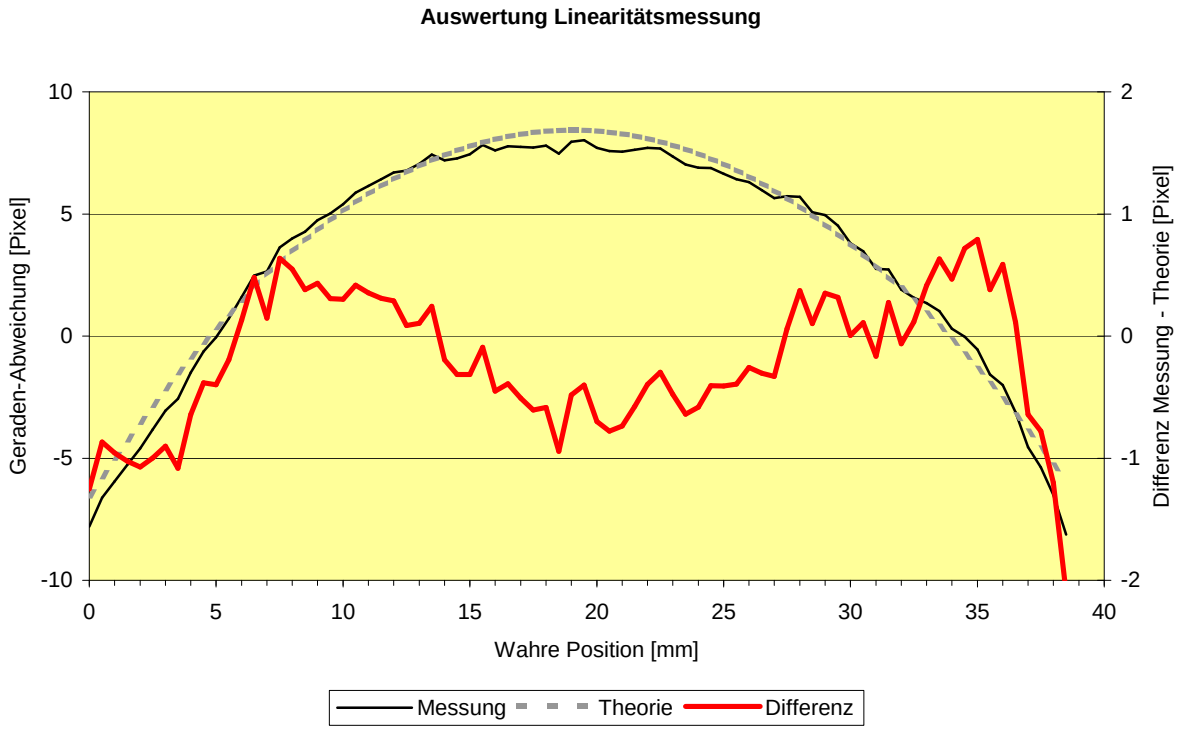

Abb. 4.4
Excel-Diagramm zur Auswertung der Linearitätsmessung. Ihr Diagramm sollte so ähnlich aussehen, wenn Sie die Parameter richtig gewählt haben. Linke Skala: graue Kurven, rechte Skala: rote Kurve.

4.12.4 Durchführung der Korrektur

Für die Auswertung der *ORFEUS II* Daten musste nicht nur eine Linearitätseichung durchgeführt werden, sondern zusätzlich auch noch eine Wellenlängen-Eichung, da die X-Achse des Detektorbildes entlang der Dispersionsrichtung der Echelle-Spektren verlief. Auch dazu gab es eine theoretische Formel, deren Parameter ebenfalls angepasst werden mussten. Diese Anpassung wurde natürlich nicht von Hand vorgenommen, sondern durch ein Programm. Dazu wurden aus den Spektren der *ORFEUS II* Mission 814 schmale interstellare Absorptionslinien identifiziert und in der Anpassung schließlich 7 Eichparameter für die Wellenlängenkalibration bestimmt (Barnstedt et al. 1999).

Für die *ORFEUS*-Spektren wurde also zu jedem X-Pixelwert der zugehörige Wellenlängenwert bestimmt; eine Umverteilung auf neue "Spektralpixel" war nicht notwendig. Wird der Detektor jedoch tatsächlich für die Aufzeichnung von Bildern verwendet, kann es notwendig werden, Bilder zu entzerren, d.h. in ein korrigiertes unverzerrtes Bild umzurechnen. Dazu muss man die Umkehrfunktion der oben durchgeführten Rechenschritte ausführen. Man muss also zu jedem Pixel im **gemessenen** Bild die **originale** Position in Pixeleinheiten bestimmen.

Tatsächlich reicht es aber nicht aus, einem gemessenen Pixel eine neue Pixelposition zuzuweisen, vielmehr muss man dies für die Eckpunkte eines Pixels berechnen und das gemessene Pixel auf das neue

Pixelraster projizieren. Dabei sind die Intensitätswerte des Pixels anteilsmäßig auf die Pixel des neuen Rasters zu verteilen. Auf diese Weise werden auch die durch lokale Bildstauchungen oder -dehnungen verursachten Helligkeitsänderungen behoben.

Aufgabe 19:

Geben Sie die Formel zur Berechnung eines korrigierten Bildes an. Ausgehend vom x-Wert (Pixelnummer) im gemessenen Bild soll die Formel den entsprechenden x-Wert in Pixeleinheiten für das korrigierte Bild liefern. Es handelt sich dabei um die Umkehrfunktion der in den Excel-Spalten ***Verstärkungsdifferenz*** *und* ***Übersprechen*** *verwendeten Formeln gemäß den Gleichungen (2.10) und (2.12).*

4.13 Hinweise zur Anfertigung des Protokolls

Folgende Angaben sollten am Anfang des Protokolls enthalten sein:

- Datum
- Versuchsbezeichnung
- Gruppennummer
- Namen (Protokollautor unterstrichen)

Die einzelnen Abschnitte des Protokolls sollten nach den Kapitelnummern der Versuchsdurchführung bzw. nach den Aufgabennummern unterteilt sein. Folgende Punkte sind bei der Aufzeichnung von Messwerten und der Ausführung von Berechnungen zu berücksichtigen:

1. Bei Messwerten sind grundsätzlich die abgelesenen Werte anzugeben (also z.B. beim Oszillografen die Ablesewerte in Skalenteilen), ggf. zusammen mit den entsprechenden Einstellungen des Messinstruments (z.B. Empfindlichkeitseinstellung des Oszillographen in [V/DIV]). In einer zweiten Spalte sind dann die daraus bestimmten Messwerte in der gewünschten Einheit anzugeben (Spannung in V im obigen Beispiel).
2. Bei allen Messwerten ebenso wie bei allen berechneten Werten sind grundsätzlich die Einheiten mit anzugeben (bei Tabellen im Spaltenkopf).
3. Bei berechneten Werten sind die verwendete Formel, alle Ausgangswerte und alle verwendeten Konstanten (mit Einheiten) anzugeben. Der Ansatz bzw. Rechenweg sollte, sofern nicht ganz offensichtlich, kurz mit Worten beschrieben werden.
4. Bei berechneten Werten sind grundsätzlich nur so viele Dezimalstellen anzugeben, wie es der Messgenauigkeit entspricht. (Bei 1% Messgenauigkeit ist ein berechneter Wert nicht als 12,34567 sondern als 12,3 anzugeben, entsprechend aber auch ein Wert von z.B. 23 als 23,0.)
5. Bei der Auswertung von Grafiken sind die zur Auswertung benutzten Hilfslinien einzuzeichnen. Die Ablesewerte (in der Regel in Zentimeter) sind anzugeben, zusammen mit einem Eichfaktor, der aus der Grafik bestimmt wird.
6. Die in Excel-Dateien bestimmten Parameter sind explizit im Protokoll aufzuführen.
7. Die während des Versuchs ausgedruckten Grafiken sind zu beschriften und dem Protokoll als Anhang anzuheften. Ebenso die während der Versuchsdurchführung angefertigten Aufzeichnungen.
8. Die Ergebnisse sollten in Textform (ganze Sätze!) dargestellt werden.
9. Im Text sollte auf Tabellen und Abbildungen verwiesen werden. Tabellen haben Überschriften, Abbildungen haben Unterschriften.
10. Vor Abgabe des Protokolls sollte es von den anderen Gruppenmitgliedern gelesen und ggf. korrigiert werden.
11. Es ist sehr hilfreich, wenn die Protokolle möglichst zeitnah zur Versuchsdurchführung angefertigt werden.
12. Die Original-Aufzeichnungen sind Bestandteil des Protokolls – Originalblätter bitte beilegen (bei elektronischer Abgabe bitte einscannen).

5 Literatur und Quellen

Die für die Vorbereitung wichtigen Bücher sind mit Fettschrift hervorgehoben.

Appenzeller, I., Krautter, J., Mandel, H., Östreicher, R.: *ORFEUS focal plane instrumentation - Echelle-spectrograph.* ESA SP-281, Vol. 2, 1988, 337-339

Barnstedt, J.: *Entwicklung eines photonenzählenden transportablen Kamerasystems für astronomische Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich.* Dissertation Tübingen 1985

Barnstedt, J., Kappelmann, N., Appenzeller, I., Fromm, A., Gölz, M., Grewing, M., Gringel, W., Haas, C., Hopfensitz, W., Krämer, G., Krautter, J., Lindenberger, A., Mandel, H., Widmann, H.: *The ORFEUS II Echelle Spectrometer: Instrument Description, Performance and Data Reduction*. Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser. **134**, 1999, 561-568

Barnstedt, J., Gringel, W., Kappelmann, N., Grewing, M.**:** *The ORFEUS II Echelle Spectrum of HD 93521: A reference for interstellar molecular hydrogen*. Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser. **143**, 2000, 193-210

Bergmann, L., Schaefer, C.: ***Lehrbuch der Experimentalphysik****, III. Band, I. Teil (Wellenoptik),* 3. Auflage, Walter de Gruyter & Co., 1962

Brandt, S.: *Datenanalyse*, 3. Auflage, BI-Wissenschaftsverlag, 1992

Danks, A.C., Joseph, C., Bybee, R., Argebright, V., Abraham, J., Kimble, R., and Woodgate, B.: *The STIS MAMA Status: Current Detector Performance.* ESA SP-356, 1992, 269-274

Fraser, G.W.: *X-Ray Detectors in Astronomy.* Cambridge University Press 1989 (Kapitel 3: Microchannel Plates, S. 116)

Grewing, M., Appenzeller, I., Barnstedt, J., Bowyer, S., Hurwitz, M., Krämer, G., Kappelmann, N., Krautter, J., Mandel, H.: *ORFEUS.* ESA SP-413, 1998, 757-762

Hamamatsu Photonics K.K.: *Characteristics and Applications of Microchannel Plates.* Technical Manual RES-0795

Hurwitz, M., Bowyer, S.: *ORFEUS focal plane instrumentation: The Berkeley spectrometer*. ESA SP-281, Vol. 2, 1988, 329-331

Knapp, G.: *Crossed grid anode and its image partitioning.* Rev. Sci. Instrum. **49**, 1978, 982-987

Krämer, G., Eberhard, N., Grewing, M., Gringel, W., Haas, C., Kaelble, A., Kappelmann, N., Petrik, J., Riegger, J.: *ORFEUS: A 1m-EUV/FUV telescope on the space platform ASTROSPAS.* ESA SP-281, Vol. 2, 1988, 333-336

Lampton, M., and Carlson, C.W.: *Low-distortion resistive anodes for two-dimensional position-sensitive MCP systems.* Rev. Sci. Instrum. **50**, 1979, 1093-1097

Lampton, M., Siegmund, O., and Raffanti, R.: *Delay line anodes for microchannel-plate spectrometers.* Rev. Sci. Instrum. *58*, 1987, 2298-2305

Martin, C., Jelinsky, P., Lampton, M., Malina, R.F., Anger, H.O.: *Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors.* Rev. Sci. Instrum. **52**, 1981, 1067-1074

Siegmund, O.H.W., Gummin, M.A., Stock, J., and Marsh, D.: *Microchannel plate imaging detectors for the ultraviolet.* ESA SP-356, 1992, 89-96

Tietze, U., Schenk, Ch.: ***Halbleiter-Schaltungstechnik***. 10. Auflage, Springer Verlag, 1993

Vallerga, J.V., Gibson, J.L., Siegmund, O.H.W., Vedder, P.W.: *Flat field response of the microchannel plate detectors used on the Extreme Ultraviolet Explorer*. In: EUV, X-ray, and gamma-ray instrumentation for astronomy and atomic physics, Proc. SPIE **1159**, 1989, 382-391

VALVO: *Technische Informationen für die Industrie, Microchannel plates.* 1976

Weinzierl, P., Drosg, M.: *Lehrbuch der Nuklearelektronik.* Springer-Verlag 1970

Wiza, J. L.: *Microchannel Plate Detectors.* Nucl. Instr. Meth. **162**, 1979, 587-601

Liste der ORFEUS-Publikationen:

`http://www.uni-tuebingen.de/de/4530`

6 Anhang: Naturkonstanten

Größe	Symbol	Wert
Vakuumlichtgeschwindigkeit	c	$2{,}99792458 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}$
Elementarladung	e	$1{,}60217733 \cdot 10^{19} C$
Plancksches Wirkungsquantum	h	$6{,}6260755 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ $4{,}1356693 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$
Elektrische Feldkonstante (Permittivität des Vakuums)	ε_0	$8{,}854187871 \cdot 10^{12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$